

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS
Departamento de Física Fundamental



TESIS DOCTORAL

**Aplicación de la termoluminiscencia de la fluorita a la
dosimetría de la radiación ionizante**

MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR
PRESENTADA POR

Román González del Campo

Madrid, 2015

TP
1981
013

Román González del Campo



X-53-0310-20-2

APLICACION DE LA TERMOLUMINISCENCIA DE LA FLUORITA A LA DOSIMETRIA
DE LA RADIACION IONIZANTE

Departamento de Física Fundamental
Facultad de Ciencias Físicas
Universidad Complutense de Madrid
1980



BIBLIOTECA

© Román González del Campo
Edita e imprime la Editorial de la Universidad
Complutense de Madrid. Servicio de Reprografía
Noviciado, 3 Madrid-8
Madrid, 1980
Xerox 9200 XB 480
Depósito Legal: M-42309-1980

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

FACULTAD DE CIENCIAS FISICAS

APLICACION DE LA TERMOLUMINISCENCIA DE LA FLUORITA
A LA DOSIMETRIA DE LA RADIACION IONIZANTE.

P O R

ROMAN GONZALEZ DEL CAMPO

M E M O R I A

presentada para aspirar al Grado de Doctor en Ciencias Físicas.

JUNTA DE ENERGIA NUCLEAR
MADRID, Mayo I. 978

El presente trabajo ha sido realizado en la Sección de Protección Radiológica de la División de Protección y Medicina de la Junta de Energía Nuclear.

Quiero expresar aquí mi agradecimiento :

Al Profesor Don CARLOS SANCHEZ DEL RIO por su dirección y comentarios a la redacción de la Memoria.

Al Dr. Don EDUARDO RAMOS RODRIGUEZ, ex-Jefe de la División de Medicina y Protección, por las facilidades que me concedió para efectuar este trabajo.

A Don ANTONIO BROSED SERRETA por su ayuda en las irradiaciones X de baja energía en el Laboratorio Primario de la J. E. N.

A Don FRANCISCO TIRADO TRUJILLO, por el interés que ha puesto en la mecanografía del texto.

A Don ANTONIO PEREZ CABALLERO y Don VICTORIANO GONZALEZ HERNANDEZ por la delineación de las figuras.

Y, finalmente, al Servicio de Biblioteca y Documentación de la Junta de Energía Nuclear, especialmente a Don JOSE GARCIA ESTEIRO, por el interés que ha mostrado en la impresión de esta Memoria.

RESUMEN

	<u>Página</u>
1.- INTRODUCCION	1
2.- REQUISITOS PARA LA DOSIMETRIA TERMOLUMINISCENTE	5
3.- LA FLUORITA COMO MATERIAL TERMOLUMINISCENTE	8
4.- CARACTERISTICAS DE LAS SUSTANCIAS TERMOLUMINIS- CENTES.....	11
5.- DOSIMETRIA DE LA RADIACION IONIZANTE	12
6.- DESCRIPCION DEL DOSIMETRO	14
7.- DESCRIPCION DEL EQUIPO DE LECTURA	17
7.1.- Estabilizador de la tensión de caldeo	19
7.2.- Transformador de caldeo	19
7.3.- Elemento de caldeo	19
7.4.- Filtro de color	20
7.5.- Tubo fotomultiplicador	21
7.6.- Fuente de luz patrón	22
7.7.- Fuente de alta tensión	22
7.8.- Voltímetro digital	22
7.9.- Temporizadores	22
8.- EQUIPO DE LECTURA MULTIPLE	23
9.- FUENTES DE RADIACION UTILIZADAS	25
9.1.- Fuente de Sr-90	25
9.2.- Fuente de Co-60	25
9.3.- Fuente de radiación X	26
9.4.- Fuente de radiación X de baja energía	26

	<u>página</u>
10. - INSTRUMENTACION PARA LA MEDIDA DE DOSIS.	27
10.1. - Dosímetro SIEMENS	27
10.2. - Dosímetro BALDWIN-FARMER, Mark II	27
10.3. - Dosímetro Victoreen, RADOCON II	28
11. - CARACTERISTICAS DEL DOSIMETRO	29
11.1. - Sensibilidad en la medida de dosis gamma. .	29
11.2. - Linealidad en la respuesta a dosis gamma. .	29
11.3. - Respuesta del dosímetro en función de la ener- gía y dirección de la radiación.	30
12. - APLICACIONES PRACTICAS DEL DOSIMETRO. . .	32
12.1. - Dosimetría gamma ambiental	32
12.2. - Dosimetría personal	34
12.3. - Dosimetría de alto nivel	35
12.4. - Dosimetría personal en minas de uranio	35
13. - ESTUDIO CRITICO DEL DOSIMETRO	37
14. - DOSIMETRO TERMOLUMINISCENTE DE F_2Ca NA- TURAL , DE VARIOS FILTROS	39
14.1. - Descripción del portapelfculas	39
14.2. - Descripción de los filtros	40
14.3. - Evaluación de la dosis	42
14.3.1. - Neutrones lentos	43
14.3.2. - Evaluación de la dosis beta	43
14.3.3. -Dosis fotónica	44
15. - SUSTITUCION DE LA PELICULA POR F_2Ca	46
15.1- Preparación de los comprimidos de F_2Ca ..	47
15.2- Evaluación de la dosis fotónica	48
15.3- Evaluación de la dosis beta	50
15.4- Evaluación de la dosis de neutrones térmicos	51

	<u>página</u>
16.- CONCLUSIONES	54
BIBLIOGRAFIA	58
<u>TABLAS</u>	
4.1.- Características de las sustancias termoluminiscentes.	61
9.1.- Características principales de la Unidad de terapia ISOMATIC, Siemens.	62
9.2.- Calidades de radiación utilizadas en la unidad de Rayos-X, Müller, del Laboratorio Primario de la Junta de Energía Nuclear.	63
11.1- Respuesta a energía del disco dosimétrico de F_2Ca natural desnudo.	64
11.2- Respuesta a energía del dosímetro TL de F_2Ca natural.	65
12.1- Dosimetría Gamma Ambiental. Lecturas de dosímetros - blanco.	66
15.1- Evaluación de dosis fotónica según la ecuación $Dosis = S_n + \frac{D_{dural}}{13} + \frac{D_{300} - D_{dural}}{8}$ y respuesta a energía	67

FIGURAS

1. 1.- Diagrama esquemático de niveles de energía de un cristal aislante que exhibe termoluminiscencia debido a la radiación.	68
3. 1.-Curvas de luminiscencia. 1. Termoluminiscencia natural de una muestra de fluorita. 2. Termoluminiscencia de la misma muestra con una exposición de 10 R, después de leída la natural. 3. Termoluminiscencia de una muestra de fluorita tratada previamente a 600°C e irradiada con 10R.	69
6. 1.-Dosímetro completo y elementos que lo forman. 1. Tapa posterior del portadosímetro. 2. Arandela de sujeción. 3. Caja del portadosímetro. 4. Disco dosimétrico con la capa de fluoruro de calcio. 5. Junta tórica de goma. 6. Filtros de plomo.	70
6. 2.-Fotografía del dosímetro y de los elementos que lo forman.	71
7. 1.-Diagrama esquemático del equipo de medida...	72
7. 2.-Fotografía del equipo de lectura de dosímetros termoluminiscentes.	73
7. 3.-Curvas de transmisión de los filtros de color CORNING 5970 y CORNING 5840.	74

	<u>página.</u>
<u>FIGURAS</u>	
7. 4. - Divisor de tensión para el tubo fotomultiplicador	75
8. 1. - Equipo de lectura múltiple	76
9. 1. - Coeficientes de atenuación másicos totales en función de la energía	77
11. 1.- Respuesta del disco dosimétrico desnudo en función de la energía de la radiación.	78
11. 2. -Respuesta del dosímetro completo en función de la energía de la radiación.	79
11. 3. -Respuesta del dosímetro en función del ángulo de incidencia de la radiación para el Co-60 (1.250 Kev)	80
11. 4. - Respuesta del dosímetro en función del ángulo de incidencia de la radiación para el Cs-137 (662 Kev).	81
11. 5. - Respuesta del dosímetro en función del ángulo de incidencia de rayos-X de 118 Kev de energía efectiva.	82
11. 6. - Respuesta del dosímetro en función del ángulo de incidencia de rayos-X de 32 Kev de energía efectiva.	83
14. 1. - Portapelículas con sus tipos de filtro.	84
14. 2. - Dosis (Estaño + $\frac{\text{Dural}}{50}$ + $\frac{300 \text{ mg/cm}^2 - \text{Dural}}{10}$) en función de la energía.	85

	<u>página</u>
<u>FIGURAS</u>	
15. 1. - Sustitución de la película fotográfica por comprimidos de F_2Ca	86
15. 2. - Respuesta a energfa de la película Kodak R. M.	87
15. 3. - Dosis ($Sn + \frac{D \text{ dural}}{13} + \frac{300 \text{ mg/cm}^2 - D \text{ dural}}{8}$) en función de la energfa.	88

R E S U M E N

La necesidad de disponer de un método sencillo, rápido, preciso y económico de realizar la dosimetría de la radiación ionizante y los atractivos aspectos que presentaba la dosimetría termoluminiscente frente a la dosimetría por película fotográfica nos indujeron a estudiar, en 1.963, las características termoluminiscentes de diversas muestras de fluoritas nacionales.

La curva de luminiscencia de la fluorita presenta una serie de picos, entre los cuales destaca uno, a 250°C, que se presta a la dosimetría, por ser su temperatura lo suficientemente alta como para que no haya desvanecimiento de la señal por la prolongada permanencia del dosímetro a la temperatura ambiente y, por otra parte, no es tan elevada como para que se deje sentir demasiado la acción perturbadora de la radiación infrarroja del elemento de caldeo.

Se ha construido un dosímetro y un equipo de lectura basado en la medida de la amplitud de este pico, por lo que no son necesarios los recocidos comunes a otros métodos de dosimetría termoluminiscentes.

Se presentan las características principales de este dosímetro, entre las que destacan su sensibilidad, margen de lectura y respuesta a energía que le hacen adecuado para la dosimetría gamma ambiental, dosimetría personal y dosimetría de alto nivel.

Como este dosímetro sólo sirve para la dosimetría de la radiación gamma y de la radiación X de no muy baja energía, se ha estudiado la posibilidad de utilizar un portapelículas de varios filtros sustituyendo la película por el fluoruro de calcio, con resultados satisfactorios en la dosimetría de la radiación gamma, X, beta y neutrones térmicos.

1. INTRODUCCION

Por termoluminiscencia de una substancia cristalina se entiende la emisión de luz al calentarla a una temperatura inferior a la de incandescencia. Es un fenómeno de liberación, estimulada térmicamente, de la energía almacenada como consecuencia de haber expuesto la substancia a algún agente excitante, por ejemplo, radiación electromagnética o radiación corpuscular.

Todos los sólidos cristalinos contienen imperfecciones estructurales de varias clases, tales como ausencias de átomos o iones (vacantes atómicas, de iones positivos o de iones negativos), átomos o iones en posiciones interreticulares (intersticiales), dislocaciones de los planos de la red cristalina, impurezas químicas y otros defectos, en fin, que son combinaciones de los anteriores. Algunas de estas imperfecciones constituyen regiones de carga positiva o negativa localizada que son capaces de atraer y captar cargas de signo contrario. A estas imperfecciones se les da el nombre de "trampas".

La intensidad de captación o ligadura, es decir, la llamada profundidad de trampa, depende de la naturaleza de la imperfección. En general, un sólido puede contener diversos tipos de trampa, cada uno con su propia y característica profundidad (1).

No se conoce la teoría química y física de la termoluminiscencia pero el fenómeno básico se entiende desde un punto de vista cualitativo (2). La fig. 1.1 representa un diagrama hipotético de energía para un cristal que exhiba termoluminiscencia debido a la radiación ionizante. La figura 1.1 (a) representa el cristal virgen durante la exposición. La radiación ionizante libera un electrón de la banda de valencia a la banda de conducción, dejando un hueco en la banda de valencia. El electrón y el hueco se mueven por el cristal hasta que se recombinan con la consiguiente emisión de luz o hasta que son atrapados en las imperfecciones o estados metastables que se representan en la figura. Hay entonces dos formas posibles por las que un fotón termoluminiscente se puede emitir. Si se calienta el cristal - puede comunicarse al electrón atrapado la energía suficiente para pasarlo a la banda de conducción (fig. 1.1 (b)). Este electrón puede errar por la banda de conducción hasta que se recombina con el hueco atrapado emitiéndose un fotón termoluminiscente. O bien, la trampa del hueco puede ser menos estable que la trampa del electrón (fig. 1.1 (c)), recibiendo el hueco la energía suficiente para vagar por la banda de valencia hasta que se recombina con el electrón atrapado, emitiéndose nuevamente un fotón T. L. Puesto que las dos posibilidades son parecidas, es conveniente considerar solamente la primera (fig. 1.1 (b)). La profundidad de trampa, E , está en relación con la temperatura que se necesita para liberar el electrón y producir, así, la termoluminiscencia. A medida

que se eleva la temperatura, la probabilidad de que los electrones escapen de sus trampas aumenta, vaciándose primero las trampas menos profundas, mientras que las más profundas lo hacen a temperaturas mayores. La curva que da la intensidad luminiscente en función de la temperatura, - llamada "curva de luminiscencia", presentará un número de máximos correspondientes al número y concentración de los distintos tipos de trampas. Aunque la profundidad de - trampa es una característica de una imperfección dada, la temperatura del correspondiente pico luminiscente no es - una magnitud perfectamente determinada; depende de la velocidad de calentamiento y aumenta con esta última.

En el caso de un solo tipo de trampa la forma de la curva de luminiscencia puede predecirse teóricamente, para calentamiento lineal, mediante la fórmula de Randall y Wilkins. Según esta ecuación el área bajo la curva luz-tiempo, llamada "suma de luz", es constante para una substancia luminiscente dada expuesta a una dosis determinada. Cuanto más rápido sea el calentamiento mayor será la intensidad - del pico termoluminiscente pero más breve será la emisión de luz (3).

Cuando todas las trampas se han vaciado por calentamiento a una temperatura suficientemente alta y durante un tiempo conveniente, la substancia termoluminiscente, al enfriarse después, vuelve a su condición inicial y puede detec-

tar otra exposición a la radiación. La cantidad de luz emitida es proporcional a la dosis absorbida. De aquí el uso de la termoluminiscencia en la dosimetría de la radiación.

Para medir la dosis absorbida , o bien se mide la luz emitida que corresponde al área total de la curva o solamente a una parte de la misma, o bien se lee la altura de un determinado pico. En este último caso, la velocidad de calentamiento debe ser reproducible para evitar de esta forma fluctuaciones en la altura del pico.

2. REQUISITOS PARA LA DOSIMETRIA TERMOLUMINIS- CENTE.

En principio, la termoluminiscencia es un método dosimétrico bien sencillo: todo consiste en calentar la sustancia luminiscente para que la energía almacenada como electrones o huecos atrapados se libere en forma de luz que, una vez medida, nos dé la dosis absorbida. Sin embargo, para que esto resulte aplicable en la práctica deben de cumplirse una serie de requisitos.

En primer lugar, la energía almacenada debe conservarse durante periodos largos a temperatura ambiente, es decir, las trampas deben de ser lo suficientemente profundas para que - los electrones no sean desalojados de ellas a la temperatura ambiente, y perderse, así, parte de la energía almacenada en el intervalo entre la irradiación y la medida. La profundidad de trampa, E , debe ser por lo menos 0,7 ó 0,8 ev. para evitar este "fading" o desvanecimiento de la dosis. En este sentido la termoluminiscencia puede considerarse como una fosforescencia "congelada" que se libera al calentar la sustancia luminiscente.

En segundo lugar, el dosímetro termoluminiscente debe de tener suficiente sensibilidad si se va a aplicar a la dosimetría personal y, sobre todo, si va a utilizarse para la dosimetría ambiental.

En tercer lugar, debe poder medir en un gran intervalo de dosis para cubrir un gran número de aplicaciones, incluida la dosimetría de alto nivel.

Otros requisitos a cumplir deben ser la independencia de la tasa de dosis, una buena respuesta a la energía de la radiación, reproducibilidad y precisión, lectura rápida, tamaño pequeño y bajo precio.

De todo lo anterior, quizás lo mas difícil de cumplir sea lo referente a una buena respuesta a energía. Es el problema que se presenta en cualquier tipo de detector de la radiación ionizante, ya sea por ionización gaseosa, por película fotográfica o dosimetría por estado sólido.

A energías fotónicas inferiores a 100 Kev el proceso de absorción predominante es el efecto fotoeléctrico. Esta interacción es fuertemente dependiente del número atómico, Z . Por consiguiente, los detectores con alto Z presenta una respuesta altamente pronunciada a energías fotónicas bajas. La respuesta a energía de un detector a una energía fotónica determinada puede definirse como la respuesta del detector a esa energía en relación con la que presenta a una energía de referencia en la que el efecto fotoeléctrico es despreciable, normalmente la energía del Cobalto-60, 1,25 Mev. Se dice que el dosímetro tiene una buena respuesta a energía si su respues-

ta por roentgen varía poco con la energía, y mala si varía mucho. Los detectores con un Z efectivo parecido al del aire (7.64) presentan una buena respuesta a energía mientras que aquellos que tengan un Z efectivo que difiera mucho del del aire presentarán una respuesta a energía deficiente.

3. LA FLUORITA COMO MATERIAL TERMOLUMINISCENTE.

Las primeras medidas de la termoluminiscencia de las fluoritas españolas se realizaron en 1.963. Se obtuvieron muestras de muy variada procedencia. En 1.964 fuimos durante mes y medio a Bruselas, a la M. B. L. E. (Manufacture Belge de Lampes et de Matériel Electronique) por invitación de M. Schayes -cuyos trabajos (4) junto con el presentado por Schulman y - otros (1) en el Symposium de Madrid fueron la motivación para empezar estos estudios - para continuar estudiando las características de las muestras de fluorita nacional en su laboratorio. Estos estudios se continuaron después en Madrid, resultado de los cuales fueron la obtención de un dosímetro termoluminiscente de F_2Ca para la dosimetría personal (5).

Se han estudiado muchas variedades de fluoritas nacionales y se han encontrado grandes diferencias entre unas y otras, siendo la fluorita procedente de la mina "Fluorina", del término de Hornachuelos, provincia de Córdoba, en su variedad verde, la más conveniente. Las curvas de luminiscencia de la fig. 3.1 corresponden a esta fluorita. Una pequeña cantidad de polvo microcristalino, en cápsula de plata, se calienta lentamente en un hornillo alimentado con tensión continua estabilizada. El conjunto va encerrado en una caja metálica estanca a la luz. La luz emitida se mide con un tubo fotomultiplicador conectado a un microvoltímetro y un registrador. La temperatura de la muestra se mide con un termopar de Chromel-Alumel. La sensibilidad y reproducibilidad del sistema de medida se contro-

lan con una fuente de luz de intensidad constante, formada por carbono radiactivo y un plástico de centelleo beta.

La curva 1 de la fig. 3.1, corresponde a la termoluminiscencia natural, es decir, la termoluminiscencia que presenta la fluorita cuando se calienta por primera vez. En este caso existe un estado de saturación de las trampas como resultado de la exposición del mineral a los rayos cósmicos y a la radiactividad natural a lo largo de su existencia en el yacimiento. La curva 2 corresponde a la misma muestra irradiada con una fuente de estroncio radiactivo durante un tiempo tal que la dosis gamma equivalente es 10 roentgens, y leída después de la termoluminiscencia natural. La curva 3 corresponde a la muestra de fluorita tratada a 600°C para vaciar todas las trampas que pueda haber hasta esa temperatura y expuesta igualmente a 10 R. En esta última curva pueden distinguirse fácilmente los siguientes picos: I, a 55°C; II, a 155°C; III, a 230°C; III', a 250°C y IV, a 340°C. En la curva 2 aún persiste muy acusado el pico IV, al no ser vaciada por completo su correspondiente trampa por la simple lectura de la termoluminiscencia natural de la curva 1, en la que predomina el pico III'. La intensidad luminosa de este pico en la curva de termoluminiscencia natural es del orden de mil veces mayor que en los otros dos casos. En otras fluoritas pueden distinguirse también los picos I' y II'. Parece ser que los picos de luz de las fluoritas naturales aparecen siempre a las mismas temperaturas, para una velocidad de calentamiento determinada, y son independientes del origen, tratamiento y tipo de excitación. La única diferencia existente es la distinta amplitud, -

tanto relativa como absoluta, de los picos de las diversas muestras de mineral.

Existen también picos a temperaturas mucho más altas, por encima de 500°C , los picos V y VI, que no han podido observarse debido al efecto perturbador de la radiación infrarroja del elemento de caldeo. Estos picos no interfieren en la lectura normal; pero juegan, sin embargo, un importante papel relacionado con los efectos que tiene la luz sobre este material termoluminiscente. Estos efectos consisten en lo siguiente: cuando en la fluorita se han vaciado todas las trampas por tratamiento a alta temperatura y se irradia a continuación, las distintas trampas se van llenando proporcionalmente a la dosis. La lectura normal borra los picos hasta el IV, no afectando a los de mayor temperatura. La posterior exposición a una luz de calidad e intensidad convenientes (generalmente U. V.) transfiere una cantidad proporcional de portadores de las trampas profundas a las menos profundas, dando lugar a la posibilidad de obtención posterior de una curva de luminiscencia que puede leerse en la forma habitual, siendo la intensidad de sus picos proporcional a la dosis integrada. Este mecanismo de transferencia (6) permite leer varias veces la dosis integrada, resolviendo así, en el caso de la fluorita, la principal objeción que se pone al método termoluminiscente al compararlo con el método fotográfico, cual es la ausencia de un registro permanente de la dosis recibida. En este laboratorio se piensa iniciar estudios en este sentido.

4. - CARACTERISTICAS DE LAS SUBSTANCIAS TERMOLUMINISCENTES.

La Tabla 4.1 presenta las características principales desde el punto de vista de la termoluminiscencia de cinco de las - sustancias más empleadas (2). Se ve que el F_2 Ca natural presenta , comparativamente, ventajas e inconvenientes. Entre las primeras está su gran sensibilidad, solamente superada por el $CaSO_4:Mn$. La temperatura del pico principal de la curva T.L. es lo suficientemente alta como para que no se tengan problemas de "fading" . Entre las desventajas están su pobre respuesta a energía debido a su alto número atómico efectivo, y su sensibilidad a la luz. Desde el punto de vista económico es el mas conveniente ya que se dispone de grandes cantidades de mineral, mientras que los otros materiales resultan caros al tener que ser preparados artificialmente agregando activadores.

5. DOSIMETRIA DE LA RADIACION IONIZANTE.

Los resultados de todos estos estudios nos indujeron a su aplicación práctica, es decir, a la construcción de un dosímetro y su equipo de lectura.

Las razones fueron múltiples:

- La dosimetría termoluminiscente empezaba, por sus grandes ventajas, a desplazar a la dosimetría por película fotográfica (7).
- Los sistemas comercializados, todos ellos extranjeros, resultaban caros y los servicios de asistencia técnica de las casas representantes muy deficientes.
- Podía construirse un dosímetro y su equipo de lectura que fueran sencillos, y, por tanto, de bajo coste, y poder trabajar de forma continuada pues las averías que se presentasen serían rápidamente reparables.
- Máxima independencia de suministros del exterior.
- Respaldo a la dosimetría por película que se realiza para la JEN y para usuarios exteriores.

- Necesidad de realizar dosimetría de la radiación gamma a tres niveles: 1) Dosimetría ambiental ; 2) Dosimetría personal y 3) Dosimetría de alto nivel.

6. DESCRIPCION DEL DOSIMETRO.

Las fig. 6.1 y 6.2 muestran el dosímetro completo y sus componentes. El dosímetro, en sí, es un disco de latón con una depresión circular en la que se deposita el material termoluminiscente junto con el aglomerante. Es de suma importancia el tamaño y la uniformidad de grano. Esto último se consigue mediante una cuidadosa granulometría. El aglomerante es silicato de sosa siruposo (vidrio soluble). La caja o portadosímetro es de plástico negro y opaco y lleva en su interior dos filtros de plomo que forman con el disco dosimétrico como un pequeño emparedado. Estos filtros de plomo sirven para compensar la respuesta a energía que tiene el F_2Ca natural, gracias al espesor, estrías circulares y ventana circular central que tienen dichos filtros. Además de estanco a la luz, el conjunto es también estanco al agua y a la humedad, gracias a una junta tórica de goma en el sistema de cierre. Puede sujetarse a la solapa tanto con imperdible como con pinza y su peso es de 18 gramos aproximadamente.

El disco dosimétrico es un disco de latón de 22 mm. de diámetro por 1 mm. de espesor. La depresión central, donde va depositada y bien adherida la sustancia termoluminiscente, tiene 20 mm. de diámetro y 0,5 mm. de profundidad, siendo el valor medio de la cantidad de sustancia de 225 mg., correspondiente a un espesor de aproximadamente 72 mg/cm².

El mecanizado de los discos, a torno, exige unas tolerancias

muy estrictas para que la cantidad de sustancia termoluminiscente sea la misma en todos los discos. La dispersión en las medidas de una serie de dosímetros expuestos a la misma dosis se debe no solamente a que la cantidad de sustancia no es exactamente la misma en todos ellos sino que la capacidad térmica, que juega un importante papel en calentamiento rápido, tampoco es exactamente igual. Por todo ello, y porque además resulta más barato, actualmente se obtienen los discos por troquelado. Aún así, a cada dosímetro se le afecta de un factor de sensibilidad que no es más que la lectura que se obtiene cuando se expone a 1 R de radiación gamma procedente de una fuente de Co-60 calibrada. Las lecturas de los dosímetros divididas por su propio factor dan las dosis reales.

La parte mas laboriosa en la construcción del dosímetro es la obtención del polvo microcristalino. El mineral, escogido a mano en el vertedero de la mina, se lava para separar la tierra. A continuación se reduce su tamaño por percusión y se hace una selección de los trozos verdes que estén desprovistos de partes blancas, cuarzo y óxido de hierro. Después viene la molienda y tamizado, primero con malla de 100 μ y luego con malla de 50 μ , con lo que el intervalo de tamaño de grano es de 50 - 100 μ . A continuación se homogeneiza con un homogeneizador en V. Debido al frotamiento de unos granos con otros durante el proceso de homogeneización existen granos de un tamaño muy pequeño ($\sim 10 \mu$) que hay que eliminar pues disminuirían la eficiencia luminosa al adherirse a la superficie de los granos de mayor tamaño. Esta eliminación se realiza mediante agitación

en agua, decantación y sifonado, una serie de veces. Se comprueba el intervalo de 50 - 100 μ con un microscopio (amplificación : 125).

A continuación se trata el polvo a 600°C durante 5 minutos para eliminar la termoluminiscencia natural. La última operación es un desferrado y se realiza haciendo pasar un fino chorro del polvo por el entrehierro de un pequeño imán con lo que se eliminan las pequeñas partículas férreas que suele contener.

Este polvo, así preparado, se deja caer en lluvia fina sobre el disco con el aglomerante diluido. Una vez seco, se elimina el exceso por abrasión. Antes de la calibración de los dosímetros con la fuente de Co-60 para la asignación del factor para cada disco se someten nuevamente a 600°C durante 5 minutos para dejarlos totalmente borrados ya que presentan una señal debido al efecto de la luz y a la triboluminiscencia o luminiscencia por frotamiento.

Al medir las dosis integradas por el dosímetro, el proceso de lectura sirve al mismo tiempo de borrado para la próxima exposición. No hay que hacer ningún tratamiento térmico o recocido, ni antes de la exposición ni antes de la lectura, ya que, a diferencia de otros materiales termoluminiscentes, tales como el F Li, la curva de luminiscencia permanece estable y la medida de la dosis se basa en la determinación de la amplitud del pico principal y no en la medida de parte del área bajo la curva de luminiscencia, lo cual requeriría eliminar los picos de baja temperatura que están sometidos a "fading".

7. DESCRIPCION DEL EQUIPO DE LECTURA

El equipo de lectura diseñado para la medida de la dosis utiliza, según queda dicho, el método de medida de la altura del pico en lugar de medida del área bajo la curva de luminiscencia. Con esto se evita el tener que hacer recocidos antes de la lectura para eliminar la parte de la curva susceptible de "fading" según se hace en el método de medida del área.

El pico cuya amplitud se determina, es el III' de la curva 3 de la fig. 3.1. Este pico es el más conveniente, no sólo por ser el de mayor amplitud sino también porque su temperatura, 250°C, es lo suficientemente alta como para que no haya "fading" de la señal por la prolongada permanencia del dosímetro a la temperatura ambiente, y por otra parte, no es tan elevada como para que se deje sentir demasiado la acción perturbadora de la radiación infrarroja del elemento de caldeo.

El equipo, en esencia, es el mismo utilizado en la obtención de las curvas de luminiscencia de las fluoritas estudiadas. La única diferencia estriba en que, ahora, la medida se hace a calentamiento rápido para que el pico sea más estrecho y se puedan detectar bajas dosis. El elemento de caldeo es una lámina de grafito. La elevada corriente de caldeo se toma del secundario de un transformador alimentado con tensión muy estabilizada para evitar fluctuaciones en la altura del pico para la misma dosis.

La fig. 7.1 representa el diagrama esquemático del equipo de medida y la Fig. 7.2 una fotografía del equipo lector.

El pico III aparece a los 9 seg. Inmediatamente después, el temporizador T1 corta la señal enviada al voltímetro digital con lo que la influencia perturbadora de la radiación infrarroja procedente del grafito y la de la cola del pico IV quedan muy disminuidas. De esta forma pueden leerse dosis tan bajas como 1-2 mR. Para que el dosímetro, después de la lectura, quede borrado y dispuesto para otra exposición a la radiación ionizante hay que seguir el calentamiento hasta 11 seg., tiempo al que está ajustado el temporizador T2, que en ese momento corta la corriente del primario del transformador. La luz emitida por el dosímetro pasa a través de un filtro violeta que deja pasar la longitud de onda de la luz a medir por el tubo fotomultiplicador. El voltímetro digital trabaja en una modalidad en la que fija la excursión máxima de la curva de luminiscencia.

La alta tensión del tubo fotomultiplicador se ajusta para conseguir una equivalencia entre voltios leídos en el voltímetro y roentgens de exposición gamma del dosímetro a la fuente calibrada de Co-60. Una vez conseguida esta equivalencia, la constancia de la amplificación se controla con una fuente constante de luz.

A continuación van descritos, con sus características más relevantes, los distintos componentes del sistema de medida.

7.1 ESTABILIZADOR DE LA TENSION DE CALDEO.

El regulador automático de tensión es el Modelo 1000-ST de Electrónicas BOAR con tensión de entrada 95-130 volt y tensión de salida de 115 volt.

7.2 TRANSFORMADOR DE CALDEO

Es un transformador de baja, para aplicar la tensión del secundario, 3,7 volts., directamente al elemento de caldeo. La intensidad por la lámina de grafito es de 92 amp. por lo que la potencia de caldeo es de 340 vatios.

Para poder tener más flexibilidad en las condiciones de caldeo, especialmente cuando hay que cambiar de grafito, se intercala entre el regulador automático de tensión y el transformador un autotransformador variable POWERSTAT.

7.3. ELEMENTO DE CALDEO

El material más idóneo de los ensayados es el grafito. No todos los grafitos comerciales sirven. Ha de tener poca resistividad y no ha de ser demasiado duro ya que hay que mecanizarlo. El grafito puro no sirve por demasiado frágil.

En una placa de 40 mm. x 23 mm. x 5 mm. se reduce la parte central, entre las abrazaderas, a 1 mm. de espesor donde se deposita el disco dosimétrico. Las abrazaderas de latón y los extremos de la placa de grafito van cobreados y plateados para con-

seguir un buen contacto eléctrico. Puesto que el caldeo es de suma importancia en la dosimetría termoluminiscente, el contacto entre la superficie de la lámina de grafito y la base del disco de latón que reposa sobre ella ha de ser el mejor posible y además reproducible. Hay que procurar también que el aire entre los dos, al calentarse y dilatarse rápidamente, no desplace el disco durante los 9 segundos que dura la medida. El calentamiento ha de partir además desde la línea central de la placa de grafito y simétricamente hacia los dos lados, lo cual significa que las dos abrazaderas trabajan por igual. Esto último se comprueba calentando el grafito en vacío, es decir, sin disco dosimétrico: la incandescencia del grafito debe ser simétrica. Para reducir en lo posible la radiación infrarroja de la lámina de grafito se recorta ésta según la forma circular del disco para que éste "tape" al máximo el elemento de caldeo. El grafito, así diseñado, es de gran duración pues al absorber el disco gran parte del calor disipado no deja ponerse al grafito incandescente.

7. 4 FILTRO DE COLOR.

Antes de la elección del filtro de vidrio coloreado hay que determinar con exactitud la longitud de onda de la luminiscencia emitida por el pico III' de la fluorita empleada. Este trabajo nos lo han realizado en la División de Física de la Junta de Energía Nuclear, siendo la longitud de onda medida de 375 m μ .

El filtro elegido es el CORNING 5970 cuya curva de transmisión viene representada en la fig. 7.3. Se ha probado también el filtro CORNING 5840 pero se ha preferido el primero, porque el 5840 tiene demasiada absorción y para conseguir la equivalencia $1R = 1V$ habría que aumentar la alta tensión del tubo fotomultiplicador con la consiguiente subida de la corriente oscura. Además de los filtros de color, ocasionalmente y cuando las dosis a medir son muy altas, se usan filtros grises atenuadores para ampliar el margen de medida.

7.5. - TUBO FOTOMULTIPLICADOR

La elección del tubo fotomultiplicador está basada en que ha de tener alta ganancia, corriente oscura muy baja y una respuesta espectral adecuada a la longitud de onda a medir.

El tubo fotomultiplicador que mejor reúne estas condiciones es el EMI 9514 S con una ganancia del orden de 10^8 , corriente oscura del orden de 10 nA y un máximo de la respuesta espectral a 380 m μ . Este tubo tiene 13 dinodos y el divisor de tensión diseñado es el de la fig. 7.4. Los valores de las resistencias de la cadena de dinodos se han escogido para que la corriente sea por lo menos 10 veces la corriente anódica. El valor recomendado para la tensión entre el cátodo y el primer dinodo es de 150 volts, independiente de la alta tensión aplicada a la cadena, cosa que se consigue con el diodo ZENER ZL 150. La respuesta del tubo se aparta de la linealidad cuando la tensión de salida es de 70 volts (70 roentgens) por lo que la medida de altas dosis se realiza con filtros atenuadores calibrados.

7.6 FUENTE DE LUZ PATRON.

Para controlar la constancia de la amplificación del sistema se utiliza una fuente de luz constante. Esta se ha construido con Carbono-14, emisor beta puro de 158 Kev de energía máxima y 5600 años de periodo de semidesintegración, en forma de una pequeña y muy fina capa de CO_3Ba encima de la cual se dispone un disco de plástico de centelleo beta, PILOT SCINTILLATOR B, conteniendo difenilestilbeno (8). El espectro de fluorescencia de esta sustancia de centelleo tiene un máximo a 400 mμ. El conjunto va encerrado en un disco estanco.

7.7 FUENTE DE ALTA TENSION

La fuente de alta tensión estabilizada es PHILIPS, modelo PE 4839 o bien FLUKE, modelo 412B.

7.8 VOLTIMETRO DIGITAL.

El voltímetro digital utilizado es un SOLARTRON modelo LM 1440.3 de 5 dígitos. La escala normalmente usada es la de 30,000 volts, con lo que la última cifra, que indica los milivoltios, son los mR en la lectura. Como ya se ha dicho este voltímetro trabaja congelando la lectura del pico.

7.9 TEMPORIZADORES

Los temporizadores son de motor síncrono, de la marca CROUZET, tipo 88.221 y uno, el T1, está ajustado a 9 seg. y el otro, el T2, está ajustado a 11 seg.

8. EQUIPO DE LECTURA MULTIPLE.

Aunque la medida de la dosis solo dura 9 segundos, tiempo necesario para la aparición del pico III' desde que empieza el calentamiento a la temperatura ambiente, el tiempo medio empleado para la lectura de cada dosímetro, en una serie de ellos, es de unos dos minutos pues hay que esperar a que se enfríe el grafito para partir nuevamente de la temperatura ambiente en la lectura del siguiente. El enfriamiento se consigue mediante chorro de aire.

Para reducir el tiempo medio de lectura por dosímetro se ha ideado un lector múltiple en el que se emplean 16 grafitos en un disco que se gira a mano (fig. 8.1) y parecido al plato de un tocadiscos. La corriente de caldeo para cada uno de los grafitos se consigue mediante contactos deslizantes al modo de escobillas, que en este caso son de cobre.

De esta forma cuando un determinado grafito entra en funcionamiento, ha transcurrido un tiempo suficiente desde la vez anterior en que se calentó para que se enfríe por sí solo, sin enfriamiento forzado por aire.

Este sistema tiene la ventaja de que es mas rápido que el del lector sencillo en la lectura de un gran número de dosímetros, pero tiene el inconveniente de que el caldeo no es reproducible de un grafito a otro, bien porque éstos no salen exactamente iguales, bien porque los contactos eléctricos tampoco lo son. Para la medida de dosis en las que no se requiera demasiada precisión podría

servir si lo que interesa es la rapidez. Podría solventarse este inconveniente afectando a cada grafito de un factor pero el proceso se complicaría , pues en ese caso habría que manejar dos clases de factores en cada lectura: el factor del dosímetro y el factor del grafito empleado.

9. FUENTES DE RADIACION UTILIZADAS.

Las fuentes de radiación utilizadas, tanto para el estudio de las curvas de luminiscencia de las fluoritas estudiadas, como para determinar las características del dosímetro y del equipo lector, tales como respuesta a la dosis, respuesta lineal del tubo fotomultiplicador, respuesta a energía, etc., han sido las siguientes:

9.1 FUENTE DE Sr-90

Es una fuente circular de aproximadamente 5 mm. de diámetro, no calibrada, que ha servido para irradiar tanto las muestras de fluorita, en la obtención de las curvas de luminiscencia, como los discos dosimétricos. La geometría no es buena, pues se pone la fuente casi en contacto con la cápsula de plata que contiene el polvo de fluorita o bien el disco dosimétrico, pero es reproducible. La equivalencia entre la dosis beta de esta fuente y la dosis gamma de la fuente de Co-60 es de 1 min. Sr-90 \simeq 1 R de Co-60.

9.2 FUENTE DE Co-60

Es una esfera de cobalto con funda de níquel de 7,5 mm. de diámetro y encapsulada en aluminio de 0,85 mm. de espesor de pared. La actividad efectiva era de 1,575 Ci de Co-60 en 1º de Octubre de 1.961. Como periodo de semidesintegración se ha venido tomando desde entonces el valor de 5,24 años.

9.3 FUENTE DE RADIACION X

ISOMATIX, Siemens. Generador radiológico monobloque para las terapias profunda, semiprofunda y cutánea.

La tabla 9.1 indica las características más principales de esta unidad.

La energía efectiva se ha determinado a partir de la capa hemirreductora (CHR), según la ecuación

$$\mu/\rho = \frac{0,693}{\rho} \frac{1}{\text{CHR}}$$

siendo μ/ρ el coeficiente de atenuación másico total y ρ la densidad, que para el cobre se ha tomado como $\rho_{\text{Cu}} = 8,94 \text{ gr/cm}^3$ y para el aluminio $\rho_{\text{Al}} = 2,699 \text{ gr/cm}^3$

La fig. 9.1 sirve para deducir las energías efectivas a partir de los valores de μ/ρ calculados para algunas de las calidades más adecuadas para este estudio en esta unidad de terapia.

Como la energía efectiva mas baja que se puede obtener con esta unidad es la de 32 Kev, e interesan energías inferiores a este valor, se ha utilizado también otra unidad de rayos-X existente en el Laboratorio Primario de la Junta de Energía Nuclear.

9.4 FUENTE DE RADIACION X DE BAJA ENERGIA.

Unidad de Rayos-X, Müller, de 150 Kvp máx.

La TABLA 9.2 indica las energías utilizadas.

10. INSTRUMENTACION PARA LA MEDIDA DE DOSIS

10.1 DOSIMETRO SIEMENS

La cámara de ionización utilizada es del tipo dedal con respuesta a energía prácticamente plana entre una capa hemirreductora (CHR) de 0,07 mm. Cu (= 2 mm Al) y 4 mm Cu. , correspondientes a una tensión en el tubo de aproximadamente 80 Kv hasta 300 Kv.

El dosímetro SIEMENS tiene la ventaja de que no hay que hacer corrección de presión y temperatura, ya que tiene un patrón de radiación con una fuente incorporada de Carbono-14.

Con este instrumento se han medido las dosis en las irradiaciones de los dosímetros con la unidad ISOMATIX.

10.2 DOSIMETRO BALDWIN - FARMER, Mark II

Este instrumento para la medida de dosis fué el primeramente utilizado (5) . La pequeña cámara de ionización viene afectada de factores de corrección , según la calidad de la radiación, y hay que hacer también las correcciones de presión y temperatura según la ecuación

$$\text{Factor de corrección , } F = \frac{273 + t^{\circ} \text{ C}}{295} \times \frac{760}{P_{\text{mmHg}}}$$

para corregir las medidas a 760 mmHg de presión y 20°C de temperatura.

10.3 DOSIMETRO VICTOREEN, RADOCON II

La sonda utilizada es la del modelo 555-10LA con una respuesta a energía del $\pm 5\%$ entre 6 - 35 Kev efectivos. Viene calibrada con sus factores de corrección y es la que se ha utilizado en el laboratorio primario de la JEN, para la exposición a bajas energías.

11. CARACTERISTICAS DEL DOSIMETRO.

Con los medios descritos anteriormente, se han determinado las características más importantes del dosímetro con vistas a su aplicación práctica.

11.1 SENSIBILIDAD EN LA MEDIDA DE DOSIS GAMMA.

La dosis mínima detectable es de aproximadamente 1 mR. Esto viene determinado conjuntamente por el dosímetro y su equipo de lectura.

Cuando el dosímetro ha recibido una fuerte dosis, la simple lectura no deja borrado totalmente el dosímetro debido a la influencia de la cola del pico IV, por lo que si con el mismo dosímetro quieren medirse después dosis bajas hay que someterle a 600°C durante 5 minutos. Este tratamiento puede haber cambiado la sensibilidad por lo que es necesaria una nueva calibración para la determinación del factor. Por eso conviene no usar el mismo dosímetro para la medida de dosis de niveles diferentes en varios órdenes de magnitud.

11.2 LINEALIDAD DE LA RESPUESTA A DOSIS GAMMA.

El dosímetro responde de forma lineal con dosis crecientes hasta unos 30.000 R. Como la fuente de Co-60 utilizada no es lo suficientemente intensa para obtener, en tiempos prudenciales, dosis elevadas, no sabemos a qué dosis empiezan a saturarse las trampas correspondientes al pico III', pero es muy probable

que sea a dosis superiores a dicho valor. Aún así, este valor se ha obtenido con una geometría de irradiación no ideal.

Por la misma razón no se han hecho estudios sobre la independencia de la tasa de dosis, aunque la bibliografía indica que la respuesta de los dosímetros termoluminiscentes es independiente de la misma.

11.3 RESPUESTA DEL DOSIMETRO EN FUNCION DE LA ENERGIA Y DIRECCION DE LA RADIACION.

LA TABLA 11.1 y la fig. 11.1 muestran la respuesta del disco dosimétrico desnudo a la energía de la radiación incidente normalmente a la superficie del mismo. La mala respuesta a bajas energías se debe, como ya se ha dicho anteriormente, al alto número atómico efectivo del F_2Ca aunque no es tan alta como en el caso de la emulsión fotográfica.

Para compensar esta respuesta se han hecho muchas pruebas de filtros compensadores de plomo; con y sin ventana central, con estrías y sin estrías, y variando el diámetro de la ventana central hasta llegar al filtro descrito en la fig. 6.1 (6).

La tabla 11.2 y la fig. 11.2 muestran la respuesta a energía del dosímetro completo con filtros compensadores.

Las fig. 11.3 , 11.4 , 11.5 y 11.6 muestran la respuesta del dosímetro según el ángulo de incidencia de la radiación para cuatro energías: 1250 Kev(Co-60), 662 Kev (Cs-137) y rayos-X de 118 Kev y 32 Kev efectivos. Según puede observarse la respuesta es bastante independiente de la dirección de la radiación incidente a energías altas, y solamente para bajas energías la respuesta cae mucho cuando la radiación incide por detrás.

La calibración con radiación gamma del Co-60 tanto del disco dosimétrico desnudo como del dosímetro completo para estudiar la respuesta a energía de ambos se ha realizado cubriendo el disco dosimétrico con 450 mg/cm², aproximadamente, de material equivalente al aire con el fin de eliminar la contaminación electrónica del haz y establecer así equilibrio electrónico (2) (9). El dosímetro completo ya tiene un espesor de pared de unos 150 mg/cm² , que es el espesor de la caja de plástico negro.

Como el filtro de plomo tiene una ventana circular central de 5 mm. de diámetro, el disco dosimétrico responde por ahí a partículas beta energéticas aunque no pueda evaluarse la dosis beta ya que por las características del dosímetro éste no discrimina entre dosis gamma y dosis beta. Aún así, la respuesta a beta es muy baja. Para partículas beta procedentes de Uranio-metal (233 mrad/hora, con 7 mg/cm² de filtración) la respuesta por rad de radiación beta es un 5% respecto al Co-60.

12. APLICACIONES PRACTICAS DEL DOSIMETRO.

Debido a su sensibilidad y a su gran margen de medida el dosímetro puede emplearse en: dosimetría gamma ambiental, dosimetría personal y dosimetría de alto nivel.

12.1 DOSIMETRIA GAMMA AMBIENTAL.

Es éste un campo de la dosimetría que va adquiriendo cada día más importancia, pues interesa saber el nivel de radiación al que están sometidas no solamente las personas profesionalmente expuestas sino la población en su conjunto.

La JEN lleva varios años haciendo este tipo de dosimetría utilizando este dosímetro en varios sitios: Fábrica de Uranio de Andújar, Central Nucleo-eléctrica de Santa María de Garoña, Centro Nacional de Energía Nuclear de Madrid, Depósito de residuos radiactivos de "El Cabril" y en domicilios particulares. En dichos casos esta dosimetría es operacional, es decir, se hace la dosimetría en instalaciones en funcionamiento y en sus alrededores para estudiar y correlacionar variaciones en los niveles de radiación y actividades de las instalaciones.

En otros casos, tales como Central Nuclear de Almaraz, Centro Nacional de Energía Nuclear de Soria, etc., en los que van a entrar en funcionamiento instalaciones nucleares y radiactivas, se está haciendo actualmente dosimetría gamma ambiental preoperacional para establecer una línea base de niveles de radiación y estudiar así la influencia de las ins-

talaciones en el medio ambiente cuando entren en funcionamiento.

En este tipo de dosimetría los resultados se dan en $\mu R/h$, y consiste en la colocación de gran número de dosímetros en una gran área que puede alcanzar pueblos a varios kilómetros de las instalaciones. Cuanto mayor sea el periodo de exposición mayor será la precisión en la medida. Normalmente este periodo es de tres meses. Dividiendo el resultado de la medida por el número de horas se tiene el nivel medio de radiación en $\mu R/h$ durante el periodo de exposición. Ahora bien, lo que lee el dosímetro es la dosis integrada recibida entre lecturas y el tiempo entre lecturas es, en la mayoría de los casos, mayor que el periodo de exposición que interesa, pues entre la puesta a cero y el inicio del periodo de exposición transcurre el tiempo de viaje desde el lugar de lectura al lugar a medir. Lo mismo puede decirse para el retorno, desde que comienza la retirada de los dosímetros, hasta su lectura. Estos tiempos de viaje, durante los cuales los dosímetros están sometidos a un nivel de radiación que interfiere con el que interesa medir, deben ser lo mas cortos posibles en relación con el tiempo de exposición.

Los dosímetros se cuelgan en sitios tales como árboles, postes de líneas telefónicas, etc, preferiblemente a una distancia del suelo de 1,70 m. y ello después de hacer un estudio de vientos dominantes en la zona. Cuando los dosímetros no pueden estar colocados en soportes de madera (árboles, postes etc.) y hay que colocarlos en fachadas de edificios, hay que

comprobar antes la influencia de la radiactividad natural de los materiales de construcción debida al Potasio-40, Thorio-232, y Ra-226 (10)

En la dosimetría gamma ambiental el problema fundamental reside en establecer una línea base, es decir, un punto de referencia. Cuando se ha hecho dosimetría preoperacional no hay problema, pero cuando ésta no existe hay que fijar un punto de referencia que lo establezcan una serie de dosímetros - blanco que, durante el mismo periodo de exposición que los dosímetros de estudio, están sometidos en bloque a un nivel inferior (blindaje de plomo) que es el que se resta para obtener los niveles que interesan.

La TABLA 12.1 muestra una serie de estos dosímetros-blanco, en una dosimetría en la Central Nucleo eléctrica de Santa Maria de Garoña en la que puede observarse el uso de los factores de corrección y la dispersión de las medidas.

12.2 DOSIMETRIA PERSONAL

El siguiente nivel en el que tiene aplicación este dosímetro es el de dosimetría personal.

Actualmente se está utilizando como respaldo de la dosimetría personal por película. En los casos en que se sospeche sobreexposición del personal, puede saberse rápidamente la dosis gamma, independientemente del valor que dé después la pe-

lícula, cuyo proceso de revelado es muy lento y solamente se realiza cuando ha transcurrido el tiempo establecido para un gran número de dosímetros de película, valor que, por otra parte, es el oficial.

Normalmente cada persona profesionalmente expuesta tiene un juego de dos dosímetros, uno descansa después de su lectura mientras el otro trabaja. En la medida de las dosis personales hay que restar de la dosis leída la dosis de fondo, al igual que se hace con la dosimetría por película, que suele tomarse en 0,48 mR/día que es el fondo que hay en el laboratorio de Dosimetría Personal donde se guarda el dosímetro que no trabaja.

Otra aplicación que tiene el dosímetro, en este nivel de dosimetría personal, es el de la medida de los niveles de radiación en los lugares de trabajo, al igual que en la dosimetría gamma ambiental.

12.3 DOSIMETRIA DE ALTO NIVEL.

Ya que el dosímetro se calibra con una fuente de Co-60 y debido a su amplio margen de medida, sirve también para medir la salida en bombas de cobalto utilizadas en hospitales y clínicas, entre otras aplicaciones.

12.4 DOSIMETRIA PERSONAL EN LAS MINAS DE URANIO

Otra aplicación del dosímetro, que no ha llegado a realizarse,

no por culpa del dosímetro sino por las condiciones de la mina, es la dosimetría personal de los mineros en los yacimientos de mineral de uranio (11) Con esta dosimetría no solamente se mide la exposición externa a la radiación gamma sino también la exposición interna debida a la progenie del radón. Consiste en hacer pasar el aire, mediante una pequeña bomba que lleva en la espalda el minero, a través de un disco de papel de filtro en el que queda retenido el polvo microscópico con los descendientes del radón, emisores alfa. Un disco dosimétrico, con orificio central para el paso del aire, está en contacto con el papel de filtro y se va activando con la radiación alfa. Un segundo disco mide la radiación gamma ambiental. El portafiltro con los discos dosimétricos va unido mediante tubo de plástico a la bomba aspiradora.

En el citado trabajo (11) los discos son de teflón en los que está embebido el material termoluminiscente. En nuestro trabajo el disco es de latón con el material termoluminiscente. La aplicación, pues, era bien simple, y aunque en el laboratorio dió resultado, durante la prueba en la mina no se pudieron obtener resultados porque el polvo recogido en el papel de filtro era excesivo y la autoabsorción impedía la medida de la dosis alfa en la que se funda el método. Si la atmósfera de la mina fuese más limpia en polvo, este método resultaría para la determinación de la exposición interna en WLM (Working Level Month)

13. ESTUDIO CRITICO DEL DOSIMETRO

El dosímetro, tal como está diseñado, presenta, como cualquier dosímetro, una serie de ventajas e inconvenientes.

Entre las ventajas, unas son comunes a casi todos los dosímetros termoluminiscentes y otras son propias de él. El dosímetro es de lectura rápida. Su gran sensibilidad le hace apropiado para la dosimetría gamma ambiental. Debido a su respuesta lineal a la dosis y al gran margen de medida sirve también para la dosimetría personal y la dosimetría de alto nivel. Puede tener también aplicación a la dosimetría interna en la medida de niveles de concentración de radón en la atmósfera de las minas de uranio. No tiene "fading", y por su estanqueidad a la luz y a la humedad puede utilizarse en condiciones ambientales extremas. Se calibra solamente una vez. Puede usarse un número indefinido de veces y es de bajo coste.

Pero, por otra parte, y como cualquier otro dosímetro, presenta también inconvenientes que, asimismo, unos son comunes a casi todos los dosímetros y otros propios de él. El dosímetro no ofrece registro permanente de la dosis, aunque es posible que pueda hacerse uso del "efecto de memoria" que posee. Solamente mide radiación electromagnética, es decir, X y gamma. No puede medir exposiciones a radiación beta y neutrones. A rayos X blandos la respuesta es deficiente, y esta zona de energía es importante en la dosimetría personal (rayos-X de -

-38-

diagnóstico). Y , por último, no discrimina la radiación blanda de la dura como lo hace la dosimetría por película con portapelículas de varios filtros.

14. - DOSIMETRO TERMOLUMINISCENTE DE CaF_2 NATURAL, DE VARIOS FILTROS.

Debido a las limitaciones que presenta el dosímetro descrito anteriormente, se ha pensado en la posibilidad de usar un portadosímetro con varios filtros para poder así efectuar la dosimetría personal de la radiación ionizante cuando ésta sea mezcla de distintos tipos de energías.

Desde hace tiempo se viene utilizando en el Servicio de Dosimetría Personal de la Junta de Energía Nuclear el sistema de dosimetría por película desarrollado en el Reino Unido por la United Kingdom Atomic Energy Authority y el Radiological Protection Service (12)

Todo consistiría en sustituir la película fotográfica por CaF_2 utilizando el mismo portapelículas. Pero antes de presentar los resultados obtenidos conviene describir el dosímetro de película que se utiliza en el Servicio de Dosimetría Personal y cómo se efectúa la evaluación de la dosis, así como las características mas importantes del método utilizado para poder hacer, así, un estudio comparativo de los resultados que se obtienen cuando se hace esta sustitución.

14.1 DESCRIPCION DEL PORTAPELICULA.

Este portapelícula, cuyo diagrama viene representado en la fig. 14.1, es de polipropileno y tiene la forma de una

caja rectangular articulada en uno de los lados menores mientras que en el otro está el sistema de cierre por presión. En uno de los lados mayores tiene un imperdible para prenderlo a la ropa de trabajo y en el otro hay una ranura en la que puede fijarse otro dosímetro, como por ejemplo el dosímetro T.L. medallón negro.

El portapelícula es simétrico por cuanto que la radiación puede incidir por delante o por detrás, pero puesto que la película no lo es, ya que tiene las emulsiones rápida y lenta separadas y en ambos lados, el portapelícula está marcado en una de sus caras con la palabra BACK, para llevarlo prendido en la forma correcta, es decir, con la emulsión rápida y la numeración de frente.

14.2 DESCRIPCION DE LOS FILTROS.

En el diseño de este portapelícula existen dos requisitos que son conflictivos. Por una parte los filtros deben tener un área lo suficientemente grande para que sean mínimos los efectos de borde y las fugas, y por otra, cuantos más filtros haya la información que se obtenga será mas completa y segura.

No más de seis filtros pueden adaptarse para el tipo de película dental normalmente usada en dosimetría personal y, aún así, hay que tener mucho cuidado en disminuir las fugas.

Las seis áreas de lectura están constituidas por una ventana que junto con dos filtros de plástico de distinto espesor sepa-

ran los efectos de los fotones y de las partículas beta e interpretan la exposición beta; un filtro de cadmio para la dosimetría de neutrones lentos y por último un filtro de dural y otro de estaño para la dosimetría de la radiación fotónica (X + gamma)

Cada filtro funciona como sigue:

- 1). - La ventana responde a toda radiación incidente que pueda atravesar el pequeño sobre que contiene la película e interaccionar con ésta.
- 2). - El filtro de plástico delgado (50 mg/cm²) tiene la misma respuesta a fotones que la ventana pero atenúa la radiación beta en una proporción que depende de la energía beta.
- 3). - El filtro de plástico grueso deja pasar todos los fotones excepto los de energía más baja y absorbe toda la radiación beta excepto la de energía más alta.
- 4). - El espesor del filtro de dural (aleación de cobre y aluminio) es tal (0,04 pulgadas) que empieza a absorber radiación fotónica a energías a las que la respuesta del filtro de estaño/plomo empieza a bajar de forma significativa (65 Kev) y resulta totalmente opaco a energías muy bajas (15 Kev).
- 5). - El espesor del filtro estaño/plomo (0,028 pulgadas de estaño + 0,012 pulgadas de plomo) es tal que la respuesta es casi independiente de la energía en el intervalo de 2 Mev a 75 Kev.

6). - La respuesta del filtro cadmio/plomo para la radiación fotónica es la misma que la del filtro estaño/plomo. En la exposición a neutrones lentos, la radiación gamma de captura que se produce ennegrece la película y proporciona un medio para la evaluación de la dosis. Este es un método típico en la dosimetría de neutrones térmicos.

Los filtros metálicos deben de tener el área suficiente para que no haya fugas, siendo la fuga de radiación de baja energía la que es importante. Si la radiación de baja energía alcanza la parte de película que se utiliza para la dosimetría gamma sin pasar a través del filtro estaño/plomo puede tenerse un gran error en la dosimetría gamma. Esta posibilidad se ha eliminado en gran parte disponiendo juntos los filtros de estaño y cadmio para tener así un área blindada - grande. Los dos filtros van sobre una lámina continua de plomo de 0,012 pulgadas que blindo la unión del filtro de cadmio con el del estaño y tiene una pestaña vuelta alrededor de los dos bordes exteriores del filtro gamma para proporcionar - blindaje de borde en este área de la película (fig. 14.1)

14.3 EVALUACION DE LA DOSIS.

Antes de hacer los cálculos para la determinación de la dosis real es necesario convertir las densidades ópticas observadas en la película en dosis aparentes mediante la curva de calibración. La curva de calibración se obtiene mediante la exposición de las películas que forman el juego de calibra-

ción a una fuente de Co-60 y leyendo la densidad óptica debajo del filtro de estaño. La dosis aparente es la dosis gamma equivalente. El símbolo D_{filtro} indica la dosis aparente en el filtro definido por el subíndice.

14.3.1. Neutrones lentos

La medida de la dosis debida a neutrones lentos supone el uso de un filtro de cadmio encima de la película, ennegreciéndose ésta por la radiación gamma de captura procedente del cadmio. En este porta-películas los filtros cadmio/plomo y estaño/plomo tienen la misma repuesta a la radiación gamma y cualquier diferencia en dosis aparentes bajo estos filtros se debe a una exposición a neutrones térmicos.

La ecuación que da la dosis de neutrones lentos y que se ha deducido de medidas experimentales es la siguiente:

$$\text{Dosis de neutrones lentos} = \frac{D_{\text{cadmio}} - D_{\text{estaño}}}{2.1} \text{ rems (14.1)}$$

14.3.2 Evaluación de la dosis beta

La dosis beta se calcula a partir de la diferencia en las dosis aparentes bajo la ventana y el filtro de plástico grueso. El valor de la diferencia $D_{\text{ventana}} - D_{300}$ depende solamente de la radiación beta, eliminándose, al restar, los efectos de la radiación gamma y X. Esto no es totalmente cierto porque a

energías menores de 20 Kev los fotones son absorbidos algo en el filtro de plástico.

La ecuación que da la dosis beta es la siguiente:

$$\text{Dosis beta} = F (D_{\text{ventana}} - D_{300}) \quad (14.2)$$

siendo F un factor de corrección que es función de la relación

$$R = \frac{D_{\text{ventana}} - D_{300}}{D_{50} - D_{300}} \quad \text{según la tabla siguiente}$$

Factores de corrección beta

$$\frac{D_{\text{ventana}} - D_{300}}{D_{50} - D_{300}} = R \quad \text{Factor de corrección}$$

$R \leq 2.3$	1.00
$2.3 < R \leq 3.6$	1.35
$3.6 < R \leq 6.4$	1.65
$6.4 < R \leq 12.0$	1.90

14.3.3. Dosis fotónica

La ecuación que da la dosis fotónica, es decir, la dosis debida a radiaciones X y gamma y que es aproximadamente independiente de la energía entre 2 Mev y 15 Kev es la siguiente:

$$\text{Dosis fotónica} = D_{\text{estaño}} + \frac{D_{\text{dural}}}{50} + \frac{D_{300} - D_{\text{dural}}}{10}$$

(14.3)

La figura 14.2 es una representación gráfica de esta ecuación.

Este dosímetro de película proporciona valores de la dosis fotónica dentro del 20% de error para energías entre 15 Kev y 2 Mev así como dosis beta entre 0,25 y 3,5 Mev.

Pero el dosímetro en sí no puede discriminar los fotones de baja energía de la radiación beta de alta energía. Por debajo de 20 Kev la estimación de la dosis fotónica cae rápidamente y pasa el nivel -20% a 18 Kev (fig. 14.2). Por otro lado los fotones de energía muy baja son absorbidos en gran parte en los filtros de plástico y por lo tanto dan una pseudoexposición beta. Esto compensa la caída en la respuesta a fotones cuando hay que evaluar la dosis superficial o dosis piel.

Asimismo la radiación beta de alta energía puede aparecer como radiación X pero el error que se comete es despreciable.

15. SUSTITUCION DE LA PELICULA POR F_2Ca

Como ya se ha dicho anteriormente, la utilización del portapelículas descrito para la dosimetría termoluminiscente consistiría en sustituir la película por F_2Ca .

Puesto que la dosimetría por película consiste en leer con el densitómetro las densidades ópticas en las áreas de la película que están cubiertas por los distintos filtros, hay que situar F_2Ca en esos mismos puntos.

El fluoruro cálcico se utiliza en forma de comprimidos circulares. Ahora bien, en el método fotográfico, la apertura del densitómetro, es decir, el diámetro del haz de luz, es de 3 mm. ya que es el más adecuado para evitar fugas, teniendo en cuenta la superficie de los filtros y la inhomogeneidad de la emulsión fotográfica. Comprimidos de 3 mm. de diámetro de F_2Ca resultarían demasiado pequeños por lo que se ha escogido un diámetro de 5 mm. El espesor de dichos comprimidos es de 0.4 mm.

Los comprimidos van alojados en agujeros circulares del mismo diámetro en una lámina de lucita de 1 mm. de espesor y de las dimensiones de la película dental y todo ello cubierto con el mismo papel del sobrecito de las películas para evitar la entrada de luz (fig. 15.1) La colo-

cación de los comprimidos y su retirada de los alojamientos se efectúa con aspiración mediante un tubito de goma.

15.1 PREPARACION DE LOS COMPRIMIDOS DE F_2Ca .

Los comprimidos deben de tener una consistencia suficiente para que puedan ser manipulados y utilizados en el portadosímetro sin que se disgreguen. Para ello se utiliza el mismo aglomerante que el usado para hacer los discos dosimétricos de latón descritos al principio de este trabajo, pero esta vez a la presión de 2000 kg/cm².

Los comprimidos deben de tener la misma eficiencia termoluminiscente, lo cual se consigue sacándolos iguales en peso y homogeneidad de mezcla de fluoruro y aglomerante. Para ello la cantidad adecuada de éstos se pone en la base de un cilindro de presión de 19 mm. de diámetro y se mezclan bien con varilla de vidrio procurando que esta operación sea cuantitativamente reproducible. A continuación se introduce el pistón y se somete a la presión de 2000 kg/cm² a la temperatura ambiente. Después se saca la oblea de 19 mm. de diámetro y 0,4 mm. de grosor y todavía húmeda se cuartea en seis trozos de los que se sacan los comprimidos mediante un sacabocados de 5 mm. de diámetro. Después de dejarlos secar se someten a 600°C durante 5 minutos.

El peso del comprimido resulta ser de 17 mg. .El valor medio de 18 comprimidos resultó ser $16,95 \pm 0,77$ mg. , es decir, hay una dispersión del 5%. Sin embargo la dispersión en eficiencia termoluminiscente es mayor, debido, tal vez, a que la homogeneidad en la mezcla de aglomerante y fluoruro no es la misma en todos ellos. Por eso, para realizar este estudio hay que afectar, a cada comprimido de un factor de corrección, de la misma forma que se hacía con los dosímetros de disco de latón, pero ahora el factor es la lectura que da el comprimido, después de haber sido irradiado a 1 R de Co-60, debajo del filtro de estaño.

15.2. EVALUACION DE LA DOSIS FOTONICA

Puesto que la curva de respuesta a energía del fluoruro cálcico es similar a la de la emulsión fotográfica (fig. 15.2) y el sistema de filtros es el mismo, la dosis fotónica puede obtenerse mediante una ecuación similar a la usada en el método fotográfico (Ec. 14.3) Ahora bien, los parámetros de ésta serán distintos y hay que determinarlos previamente.

Para ello, un portadosímetro con tres comprimidos en las posiciones correspondientes a los filtros de plástico grueso, dural y estaño se exponen a dosis conocidas, mediante la cámara Siemens, y a distintas energías. Se tienen así tantas ecuaciones como energías usadas. Apareando ecuaciones, de forma exhaustiva, para la determinación de las incógnitas x e y de la ecuación:

$$\text{Dosis fotónica} = D_{\text{Sn}} + \frac{D_{\text{dural}}}{x} + \frac{D_{300} - D_{\text{dural}}}{y} \quad (15.1)$$

pueden deducirse los valores de x e y para el fluoruro cálcico.

Se han hecho muchas medidas utilizando condiciones de lectura muy diferentes ya que unas veces se ha usado el lector de un solo grafito y el lector rotatorio de varios grafitos, grafito pequeño, grafito grande, soporte de plata, soporte de latón, sin soporte etc. y los valores de x e y han sido similares. El calentamiento que mejor va es colocando el comprimido sobre un disco de latón normal encima de grafito normal. El tubo fotomultiplicador utilizado ahora, debido al tamaño reducido del comprimido, es el EMI 6094S de 11 etapas y un diámetro del fotocátodo de 10 mm.

Para el cálculo matemático de x e y ha sido de gran ayuda una calculadora programable de bolsillo.

El par de valores mas adecuado es el de $x = 13$, $y = 8$.

La TABLA 15.1 da los resultados de la dosis fotónica con estos valores y la respuesta a energía.

La fig. 15.3 representa gráficamente, en función de la energía, la dosis fotónica y es una réplica de la fig. 14.2. Como puede verse la respuesta es mucho mejor, en la zona de energías estudiadas, que en el caso del dosímetro fotográfico.

15.3 EVALUACION DE LA DOSIS BETA.

La dosis beta no puede determinarse de forma precisa por no disponer de fuentes con emisores beta ni de cámara de extrapolación para la medida de la tasa de dosis.

Sin embargo, sí se ha dispuesto de Uranio metal cuya tasa de dosis superficial beta se conoce por la bibliografía (13), siendo de 233 mrad/h cuando hay una filtración de 7 mg/cm². Esta filtración se consigue colocando uno de los papeles negros que forman parte del paquete de las películas KODAK sobre una placa de Uranio metal de 1 mm. de espesor.

Ya que no se puede determinar la curva que da el factor de corrección F, en función de la relación $R = \frac{D_{\text{ventana}} - D_{300}}{D_{50} - D_{300}}$

solamente se utilizan los comprimidos correspondientes a ventana y plástico grueso.

Se tienen así los siguientes resultados:

Tiempo de exposición	:	167,33 horas
Dosis beta	:	38,99 rads
F _{ventana}	:	0,91
F ₃₀₀	:	0,77

Lecturas sin corregir

D _{ventana}	D ₃₀₀
22,30	5,22

Lecturas corregidas

D _{ventana}	D ₃₀₀
24,51	6,78

El factor F resulta entonces:

$$38,99 = F (24,51 - 6,78) \quad F = \frac{38,99}{17,73} = 2,20$$

El factor es mayor que en la película (véase apartado 14.3.2)

15.4 EVALUACION DE LA DOSIS DE NEUTRONES TERMICOS.

La exposición del dosímetro con los dos comprimidos correspondientes al filtro de estaño/plomo y al de cadmio/plomo se ha efectuado en el "beam-port" núm. 5 del reactor JEN-1. Como ya se ha dicho anteriormente el fondo gamma no influye en la medida, cosa que se ha comprobado experimentalmente. Toda diferencia de lectura entre los dos comprimidos se debe a una exposición a neutrones lentos. En la posición núm. 3 de este "beam-port" el flujo de neutrones térmicos es el siguiente:

Potencia del reactor	1 MW	300 KW
Flujo de neutrones térmicos:	$4,2 \times 10^7 \text{ ncm}^{-2} \text{ seg}^{-1}$	$1,26 \cdot 10^7 \text{ ncm}^{-2} \text{ seg}^{-1}$

Se elige una exposición de 90 seg. a la potencia de 300 KW lo que supone una dosis de : 1,18 Rems, teniendo en cuenta que 0,1 Rem de neutrones térmicos corresponde a $96 \cdot 10^6 \text{ ncm}^{-2}$

(14):

$$1,26 \times 10^7 \text{ ncm}^{-2} \text{ seg}^{-1} \times 90 \text{ seg.} = 1,134 \times 10^9 \text{ ncm}^2,$$

$$\frac{1,134 \times 10^9 \text{ ncm}^{-2}}{96 \times 10^6 \text{ ncm}^{-2}} \times 0,1 \text{ Rem} = 1,18 \text{ Rems}$$

Factores	Lecturas sin corregir		Lecturas corregidas	
	D _{estaño}	D _{cadmio}	D _{estaño}	D _{cadmio}
F _{Sn} = 1,25				
F _{Cd} = 1,27	30,67	32,96	24,53	25,95

$$1,18 \text{ Rems} = \frac{25,95 - 24,53}{x} \quad x = 1,20$$

Resulta, así, un parámetro menor que en el caso de la película (Ec. 14.1 apartado 14.3.1.)

Luego la dosis de neutrones lentos viene dada, en el caso de los comprimidos de F₂Ca, por la fórmula:

$$\text{Dosis de neutrones térmicos} = \frac{D_{\text{cadmio}} - D_{\text{estaño}}}{1,20} \quad \text{Rems}$$

- - - - -

Resumiendo, se ve que se puede substituir la película fotográfica por el fluoruro de calcio, aplicando, para la evaluación de la dosis fotónica, beta y de neutrones térmicos, las mismas ecuaciones que las utilizadas en el método por película sólo que variando los parámetros.

Esto es de una gran ventaja, pues se evita todo el proceso de revelado y calibración que supone el método por película, además de no utilizar material fungible y sometido a caducidad como es la emulsión fotográfica.

Sólo existe un inconveniente, y es que cada comprimido viene afectado de un factor de calibración, y esto en la práctica es una complicación, no solamente durante el proceso de lectura sino en los cálculos. Si se lograra producir los comprimidos con una dispersión aceptable en dosimetría personal este problema se habría resuelto.

16. - CONCLUSIONES.

Como consecuencia de los resultados obtenidos y de la experiencia conseguida en la dosimetría de la radiación ionizante mediante la termoluminiscencia del F_2Ca natural, se ha llegado a las siguientes conclusiones:

Relativas al F_2Ca natural

1. - La fluorita tiene una curva de luminiscencia que se presta a la dosimetría termoluminiscente cuando se mide la amplitud del pico III' de la curva. Este pico es el más conveniente, no sólo por ser el de mayor amplitud sino también porque su temperatura, 250°C, es lo suficientemente alta como para que no haya "fading" de la señal por la prolongada permanencia del dosímetro a la temperatura ambiente y, por otra parte, no es tan elevada como para que se deje sentir demasiado el efecto perturbador de la radiación infrarroja del elemento de caldeo.
2. - La preparación de la fluorita para la dosimetría solamente requiere una granulometría y un sencillo tratamiento térmico en la fabricación del dosímetro.
3. - Se dispone de grandes cantidades de mineral y la cantidad de éste necesaria para construir un dosímetro es tal, 225 mg. aproximadamente, que podrían suministrarse dosímetros en gran cantidad y bajo costo no sólo en lo relativo a los usos pacíficos de la energía nuclear sino, también, en caso de conflicto bélico.

Relativas al dosímetro de disco

4. - El dosímetro es de gran sencillez, fácil construcción y bajo costo.

5. - Es robusto, ligero y puede soportar condiciones ambientales extremas.

6. - Puede medir, de forma lineal, exposiciones a la radiación gamma desde 1 - 2 mR hasta 30.000 R aproximadamente, lo que le hace adecuado para la dosimetría gamma ambiental, dosimetría personal y dosimetría de alto nivel. Solo requiere una única calibración.

7. - La deficiente respuesta a energía de F_2Ca natural la compensa con filtros de plomo con un error del 20% desde 25 Kev efectivos hasta la energía del Co-60.

8. - Como todo dosímetro termoluminiscente, es de lectura rápida.

9. - El proceso de lectura sirve, simultáneamente, de borrado para la próxima exposición sin tener que hacer recocidos previos a la lectura y a la exposición.

10. - Puede usarse un número indefinido de veces.



Relativas al equipo de lectura

11.- El equipo de lectura puede estar constituido por unidades convencionales, tales como la fuente de alta tensión y el voltímetro digital y unidades construidas ex profeso, como son la alimentación para el caldeo y la cabeza de lectura.

12.- Con la elección del filtro de color adecuado y del tubo fotomultiplicador de la debida respuesta espectral puede medirse la longitud de onda de $375 \text{ m}\mu$, propia del pico principal de la curva de luminiscencia, con gran sensibilidad y sin que perturbe la radiación infrarroja.

13.- Mediante una temporización, puede disminuirse la influencia perturbadora, en la medida de bajas dosis, de la cola del pico IV de la curva de termoluminiscencia y de la radiación infrarroja del elemento de caldeo.

14.- En los casos en que se necesite leer un gran número de dosímetros con mayor rapidez y menor precisión puede usarse una cabeza de lectura con varios elementos de caldeo.

Relativas al dosímetro de varios filtros.

15.- Se puede sustituir la película por pequeños discos de F_2Ca en el portapelículas actualmente utilizado, pudiéndose efectuar no solamente la dosimetría de la radiación X y gamma sino también dosimetría beta y de neutrones térmicos. Sirven las mismas fórmulas empíricas del método por película, sólo que con distintos parámetros, determinados experimentalmente.

16. - En la evaluación de la dosis fotónica, la respuesta a energía en la zona de radiación X es incluso mejor que en el método por película fotográfica.

B I B L I O G R A F I A

- (1). -Schulman, J. H. , Attix, F. H. , West, E. J. y Ginther, J.
"Thermoluminescence Methods in Personnel Dosimetry".
Personnel Dosimetry Techniques for External Radiation.
pág. 319. ENEA Symposium, Madrid, 1963.
- (2). -Cameron, J. R. , Suntharalingam, N. , Kenney, G. N.
"Thermoluminescent Dosimetry". The University of Wisconsin Press, 1968.
- (3). - Spurny , Z. "Thermoluminescent dosimetry". Revista de Energía Atómica . O. I. E. A. Viena, 1965, Vol. 3, N. 2, pág. 61.
- (4). - Schayes, R. , Lorthioir, M. y Lheurex, M. (1963).
"La dosimetrie par thermoluminescence". 4^a parte.
"Le dosimètre thermoluminescent PNP 080".
Revue MBLE, vol. 6, n. 1, pág. 30-67.
- (5). - González del Campo, R. "Prototipo de dosímetro termoluminiscente de F_2Ca natural para la dosimetría personal".
ENERGIA NUCLEAR. nº 47. Mayo-Junio 1. 1967.
- (6). - Brooke, C. y Schayes, R. (1966) "Recent developments in thermoluminescent dosimetry, extensions in the range of applications". Symposium on Solid-State and Chemical Radiation Dosimetry in Medicine and Biology. OIEA, Viena.

- (7). - Becker, Klaus. "Preliminary Results of the 1975 International Personnel Monitoring Survey". Health Physics Division. Oak Ridge National Laboratory. Oak Ridge, Tennessee 37830.
- (8). - González del Campo, R. "Técnica de contaje beta de bajo fondo utilizando plásticos de centelleo". SMP/N-2. Junta de Energía Nuclear. Madrid, 1962.
(Circulación restringida a la JEN).
- (9). - Technical Recommendations for the use of Thermoluminescence for dosimetry in individual monitoring for photons and electrons from external sources. Radiological Protection- 3, 1975, EUR 5358e, Commission of the European Communities.
- (10). - "Radiological Problems caused by the Radioactivity of building materials". SEN/SAN (77) 23. Steering Committee for Nuclear Energy. Committee on Radiation Protection and Public Health . Nuclear Energy Agency.
O. E. C. D. Nov. 1977. Report by the Expert Group.
- (11). - Mc Curdy, D. E. , Schiager, K. J. y Flack, E. D. "Thermoluminescent Dosimetry for Personnel Monitoring of Uranium Miners". Health Physics Vol. 17, págs. 415-422 1969.
- (12). - Heard, M. J. and Jones, B. E. : "A New Holder for Personnel Dosimetry." Symposium on Personnel Dosimetry Techniques for External Radiation.
Madrid 1963.

-60-

(13). -Radiological Health Handbook, U. S. Department
of Health, Education and Welfare. Public Health
Service. pag. 204.

(14). - National Bureau of Standards, Handbook No. 63.

TABLA 4.1.-Características de las sustancias termoluminiscentes.

CARACTERÍSTICAS	LiF	Li ₂ B ₄ O ₇ :Mn	CaF ₂ :Mn	CaF ₂ :nat	CaSO ₄ :Mn
Densidad (gm/cc)	2.64	2.3	3.18	3.18	2.61
Nº Atómico efectivo	8.2	7.4	16.3	16.3	15.3
Espectro de emisión TL (Å) intervalo máximo	3500-6000 4000	5300-6300 6050	4400-6000 5000	3500-5000 3800	4500-6000 5000
Temperatura del pico principal de la curva TL	195°C	200°C	260°C	260°C	110°C
Eficiencia a Co-60 (relativa a LiF)	1.0	0.3	3	~23	~70
Respuesta a energía sin filtro (30 Kev/Cobalto-60)	1.25	0.9	~13	~13	~10
Intervalo útil	mR-10 ³ R	mR-10 ⁶ R	mR-3x10 ⁵ R	MR-10 ⁴ R	R-10 ⁴ R
Desvanecimiento (fading)	pequeño <5%/12 semanas	~10% en el primer mes	~10% en el primer mes	no detectable	50%-60% en la primeras 24 h
Sensibilidad a la luz	esencialmente ninguna	esencialmente ninguna	esencialmente ninguna	sí	sí
Forma Física	Polvo, estruido, embebido en teflón, embebido en silicona, capilares de vidrio.	Polvo, embebido en teflón	Polvo, embebido en teflón, pastillas prensadas a alta temperatura, capilares de vidrio	Dosímetros especiales	Polvo, embebido en teflón

TABLA 9.1.-Características principales de la Unidad de terapia ISOMATIC, Siemens.
Filtración inherente: 2 mm de Al.

REGISTRO	TENSION DEL TUBO Kv	INTENSIDAD DEL TUBO mA	FILTRO mm	DOSIS EN R/min. PARA DIFERENTES DISTANCIAS FOCO-CAMARA			CALIDAD RADIACION CH R mm	ENERGIA EFECTIVA Kev
				30 cm	40 cm	50 cm		
A	250	8	Th I (*)	41	23	15	2,4 Cu	118
B	250	8	1 Cu	53,5	30	19,5	1,85 Cu	
C	220	9	Th I (*)	32	18	11,5	2,18 Cu	
D	220	9	1 Cu	41	23	15	1,64 Cu	98
E	200	10	1 Cu	33	18,5	12	1,3 Cu	
F	200	10	0,5 Cu	51,5	29	18,5	0,84 Cu	74
G	180	11	1 Cu	26	14,5	9,5	1,15 Cu	84
H	180	11	0,5 Cu	43	24	15,5	0,75 Cu	
I	160	12	0,5 Cu	34	19	12	0,67 Cu	68
L	160	12	0,2 Cu	66	37	23,5	0,45 Cu	58
M	120	13	2 Al	72	40,5	26	2,8 Al	32
N	120	13	4 Al	43	24	15,5	4,5 Al	39

(*) Filtro Thoraeus I, de 0,4 mm Sn + 0,25 mm Cu + 1,0 mm Al

TABLA 9.2- Calidades de radiación utilizadas en la unidad de Rayos X, Müller, del Laboratorio
Primario de la Junta de Energía Nuclear. Filtración inherente: 2,5 mm Be.

TENSION DEL TUBO KV	INTENSIDAD DEL TUBO m A	FILTRO m m	DISTANCIA ENTRE VENTANA Be - PLANO MEDIDA m m	CALIDAD RADIACION CHR m m	ENERGIA EFECTIVA K eV
30	5	0,200 Al	752	0,185 Al	12-13
50	5	0,5081 Al	752	0,567 Al	18
70	5	0,9837 Al	752	1,326 Al	24,1

TABLA 11.1-Respuesta a energía del disco dosimétrico de F_2Ca natural desnudo.

REGISTRO	ENERGIA EFECTIVA (KeV)	DOSIS CAMARA (R)	LECTURA T.L. (x5)	LECTURA T.L./R	RESPUESTA RELATIVA Co-60
Co-60	1250 (fuente)	26,13	7,757	0,297	1
A	118	15,0	9,666	0,644	2,17
D	98	12,0	10,134	0,845	2,85
G	84	10,0	10,338	1,034	3,48
F	74	10,0	11,979	1,198	4,03
I	68	8,0	10,876	1,360	4,58
L	58	7,0	12,531	1,790	6,03
N	39	6,0	12,536	2,089	7,03
M	32	9,1	19,924	2,189	7,37
	26	11,1	23,903	2,153	7,25
	18,5	14,0	24,004	1,715	5,77
	13	13,9	13,012	0,936	3,15

Calefacción: 112 div. F.L: 0,325 volts, $T_1=9\text{seg}$, $T_2=11\text{seg}$, H.V.=1000 volts, tubo P.M. 9514 S.
 Lector sencillo, Localizador irradiación X=50 cm, Filtro atenuador= X5, Escala 30 volts.

TABLA 11.2- Respuesta a energía del dosímetro TL de F_2Ca natural.

REGISTRO	ENERGIA EFECTIVA (Kev)	DOSIS CAMARA (R)	LECTURA T.L. (x 5)	LECTURA T.L./R	RESPUESTA RELATIVA Co 60
Co-60	1250(fuente)	26,13	6,644	0,254	1
A	118	26,0	6,923	0,266	1,05
D	98	26,0	6,530	0,251	0,99
G	84	26,0	6,192	0,238	0,94
F	74	26,0	6,708	0,258	1,02
I	68	26,0	6,153	0,237	0,93
L	58	26,0	6,242	0,240	0,94
N	39	26,0	6,291	0,242	0,95
M	32	26,0	6,118	0,235	0,93
	26	37,8	7,923	0,210	0,83
	13,5	37,7	6,306	0,167	0,66
	13	37,5	3,143	0,084	0,33

Calefacción: 112 div, F.L.: 0,325 volts, $T_1 = 9\text{seg.}$, $T_2 = 11\text{seg.}$, H.V=1000 volts, tubo P.M: 9514 S.

Lector sencillo, Localizador irradiación X= 50 cm, Filtro atenuador= X5, Escala 30 volts.

TABLA 12.1- Dosimetría Gamma Ambiental. Lecturas de dosímetros - Blanco.

Nº DOSIMETRO	TIEMPO EXPOSICION	LECTURA (mR)	FACTOR DE CORRECCION	LECTURA CORREGIDA (mR)	$\mu R/h$
000	96 dias	26	1,514	17,173	7,5
+ 000 8	"	16	0,961	16,649	7,2
+ 00106	"	23	1,320	17,424	7,6
+ 000	"	22	1,326	16,591	7,2
00088	"	23	1,396	16,476	7,2
+ 000 0	"	23	1,348	17,062	7,4
+ 0006	"	22	1,278	17,214	7,5
+500080	"	23	1,371	16,776	7,3
500101	"	23	1,361	16,899	7,3
500097	"	23	1,229	18,714	8,1
500057	"	23	1,189	19,344	8,4
+500096	"	24	1,201	19,983	8,7
+500079	"	24	1,280	18,750	8,1
+500078	"	23	1,244	18,489	8,0
+500066	"	22	1,305	16,858	7,3
+500088	"	22	1,334	16,492	7,2
+500098	"	24	1,364	17,595	7,6
+500060	"	21	1,149	18,277	7,9
+500104	"	17	0,940	18,085	7,8
+500054	"	19	1,173	16,198	7,0
500090	"	22	1,297	16,962	7,4
500060	"	18	1,031	17,459	7,6
valor medio:		valor medio:		Valor medio	
21,9 \pm 2,4		17,521 \pm 1,01		7,6 \pm 0,4	
Dispersión:		Dispersión:		Dispersión	
\pm 11%		\pm 5,8%		\pm 5,8%	

TABLA 15.1-Evaluación de dosis fotónica según la ecuación $Dosis = Dosis_{Sn} + D_{300-D} \frac{13}{8}$ y respuesta a energía.

REGISTRO	ENERGIA EFECTIVA (Kev)	DOSIS CAMARA (R)	LECTURAS SIN CORREGIR			LECTURAS CORREGIDAS			DOSIS T.L. (R)	DOSIS T.L. DOSIS CAMARA
			D 300	D dural	D estaño	D 300	D dural	D estaño		
Co-60	1.250	29,95 (fuente)	33,04	29,01	21,81	35,15	34,54	29,08	31,81	1,06
A	118	10.0	26,39	22,78	5,91	28,07	27,12	7,88	10,08	1,01
D	98	10.0	33,97	30,07	5,22	36,14	35,80	6,96	9,76	0,98
G	84	9.0	38,08	33,06	4,18	40,51	39,36	5,57	8,74	0,97
F	74	8.0	39,01	32,91	3,39	41,50	39,18	4,52	7,82	0,98
I	68	7.0	40,59	33,84	2,58	43,18	40,29	3,44	6,90	0,99
L	58	6.0	44,70	33,78	1,52	47,55	40,21	2,03	6,04	1,01
N	39	5.0	44,49	31,60	0,72	47,33	37,62	0,96	5,07	1,01
M	32	5.2	46,99	28,08	0,52	49,99	33,43	0,69	5,33	1,03
	24	8.50	74,10	32,25	0,28	78,83	38,39	0,37	8,38	0,99
	18	5.00	32,86	10,87	0,05	34,96	12,94	0,07	3,82	0,76
	12-13	8.84	31,93	3,79	0,02	33,97	4,51	0,03	4,06	0,46

Comprimidos de 5 x 0,4 mm. Calefacción=65 div. F.L.=1,26v. (escala 100). T₁=9seg. T₂=12 seg. H.V.=1375 volts. tubo P.M.:6094 S.

Grafito normal con disco normal de latón. F₃₀₀=0,94; F dural =0,84; F_{Sn}=0,75.

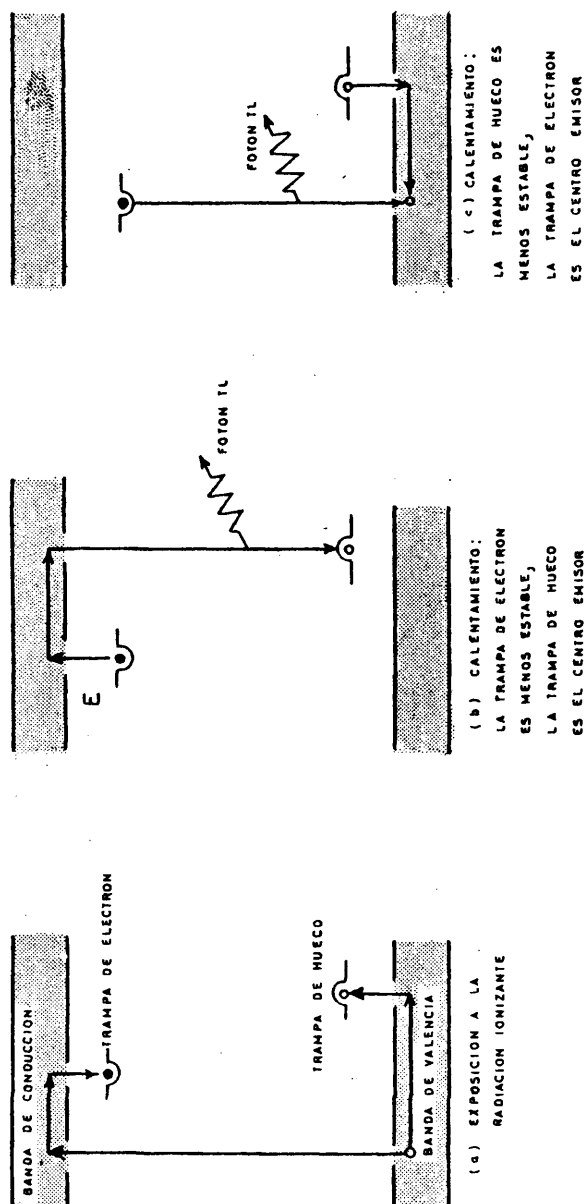


Fig. 1.1. - Diagrama esquemático de niveles de energía de un cristal aislante que exhibe termoluminiscencia debido a la radiación.

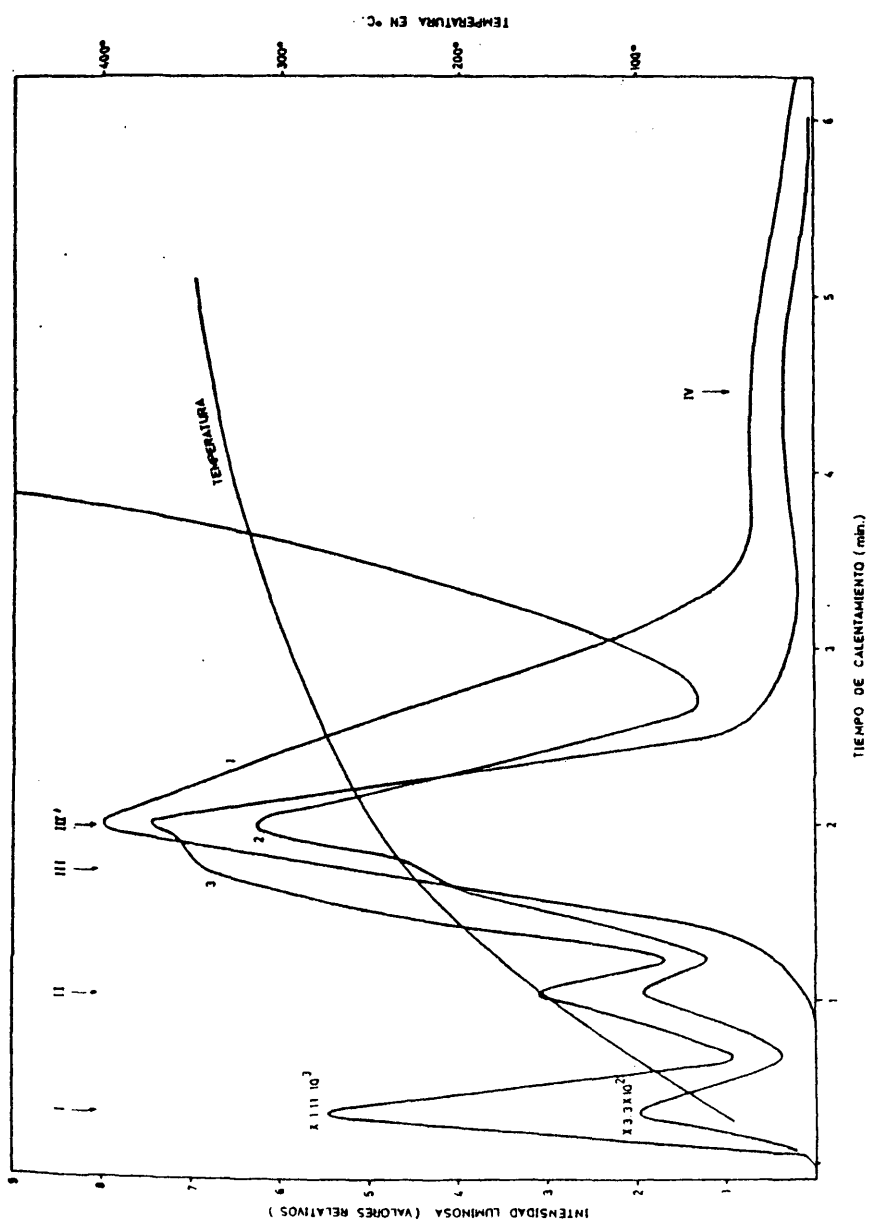
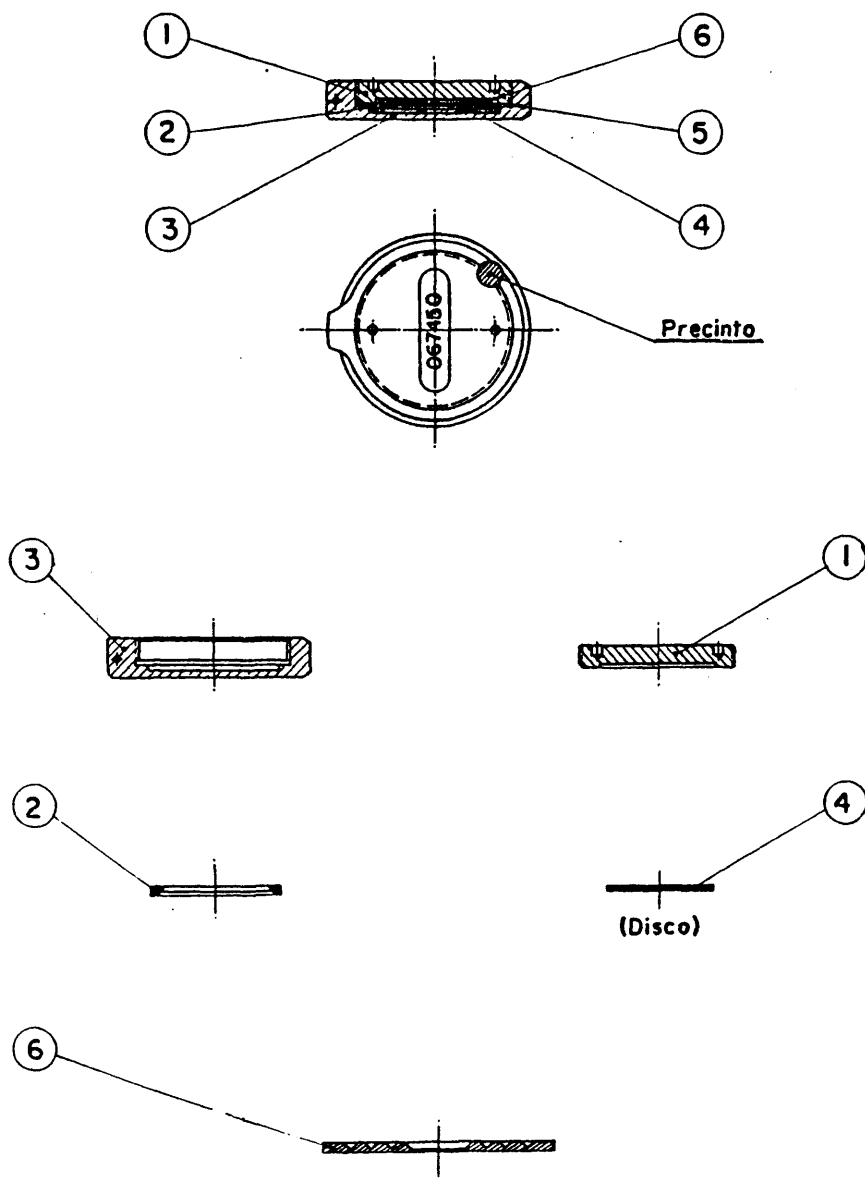


Fig. 3. 1. -Curvas de luminiscencia. 1. Termoluminiscencia natural de una muestra de fluorita. 2. Termoluminiscencia de la misma muestra con una exposición de 10 R. después de leída la natural. 3. Termoluminiscencia de una muestra de fluorita tratada previamente a 600 °C e irradiada con 10 R.



Dosímetro completo y elementos que lo forman. 1. Tapa posterior del portadosímetro. 2. Arandela de sujeción. 3. Caja del portadosímetro. 4. Disco dosimétrico con la capa de fluoruro de calcio. 5. Junta tórica de goma. 6. Filtros de plomo.

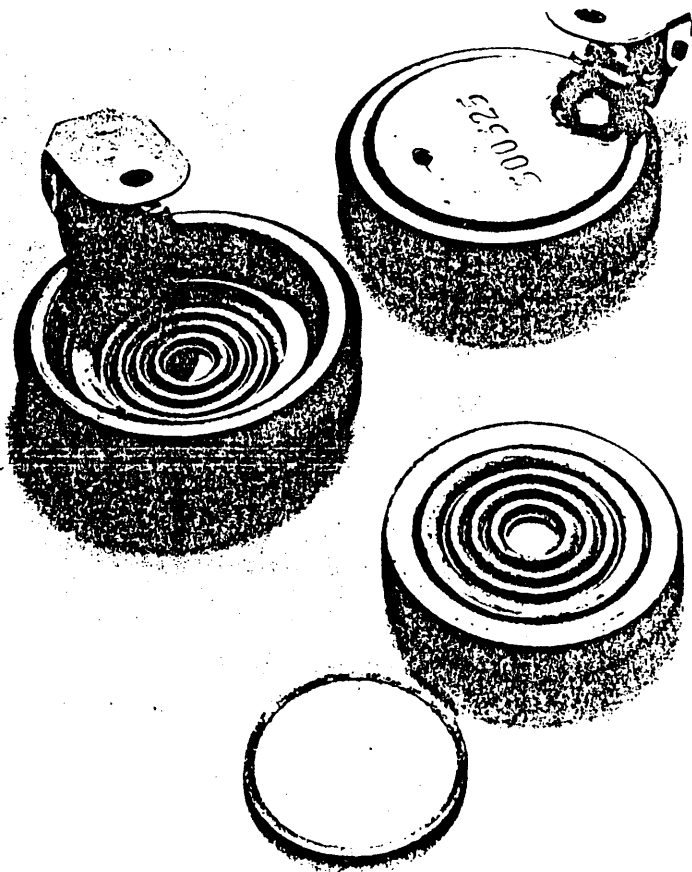


Fig. 6.2- Fotografía del dosímetro y de los elementos que lo forman.

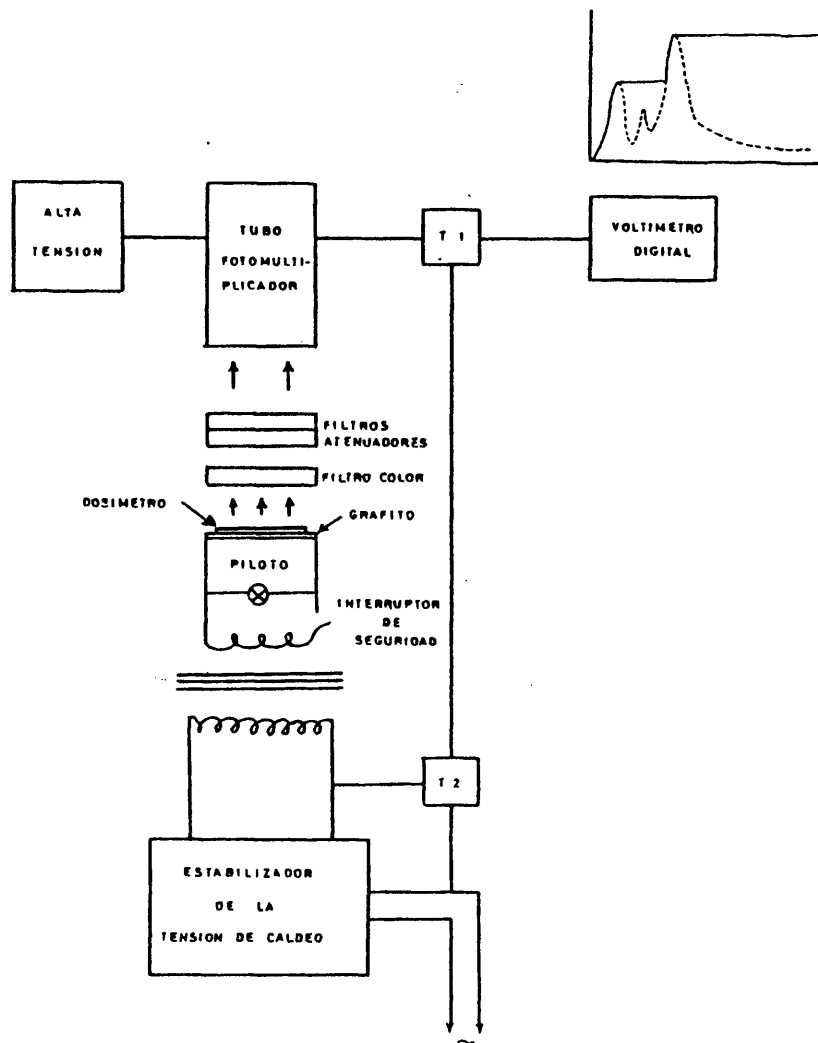


Fig. 7.1-DIAGRAMA ESQUEMATICO DEL EQUIPO DE MEDIDA .

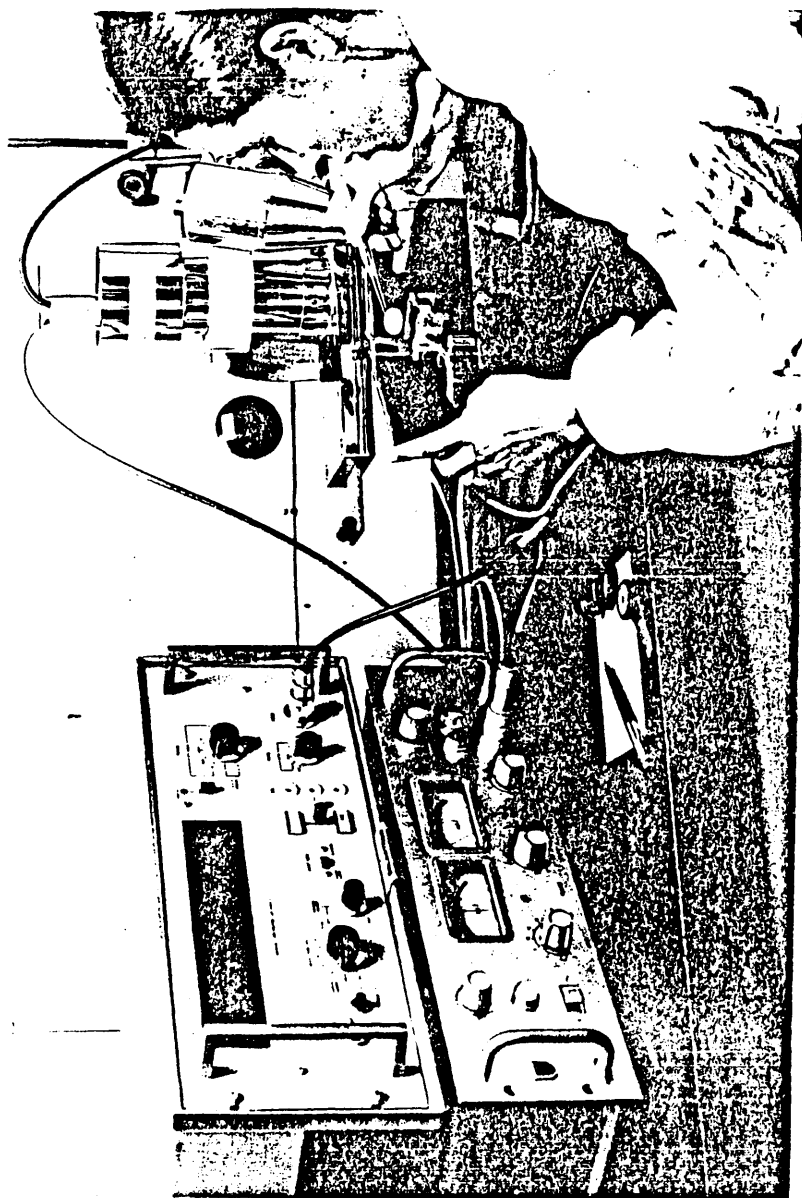
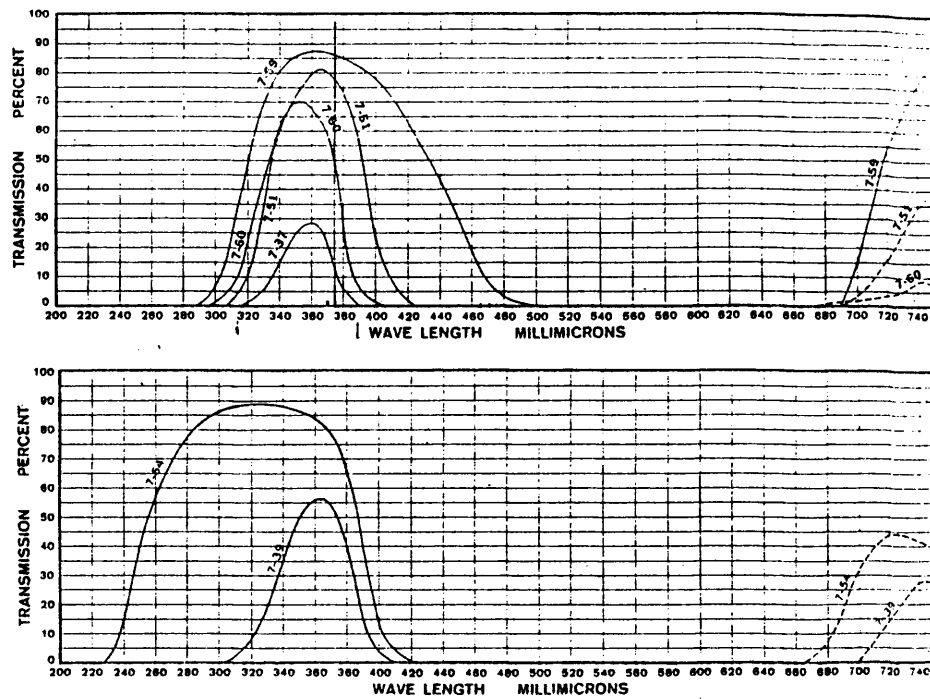


Fig. 7.2. - Fotografía del equipo de lectura de dosímetros termoluminiscentes.

-784-

ultraviolet transmitting visible absorbing filters



CONTROL DATA—ULTRAVIOLET TRANSMITTING—VISIBLE ABSORBING FILTERS

C.S. Number	Glass Number	Stock Thickness (mm.)	TRANSMITTANCE AT WAVE LENGTH		
			254 mμ	365 mμ	405 mμ
7-54	9863	2.9—3.1	> 40%		
→ 7-51†	5970	4.9—5.1		> 80%	
→ 7-60	5840	4.4—4.6		> 55%	
7-59*†	5850	3.5—4.5		> 82%	> 70%
7-37	5860	4.9—5.1		> 21%	
7-39	5874	4.9—5.1		> 50%	

*Also controlled in the visible region. 700 mμ = 15 ± .7%

†This curve is newly revised.

Fig. 7.3- Curvas de transmisión de los filtros de color CORNING 5970 y CORNING 5840.

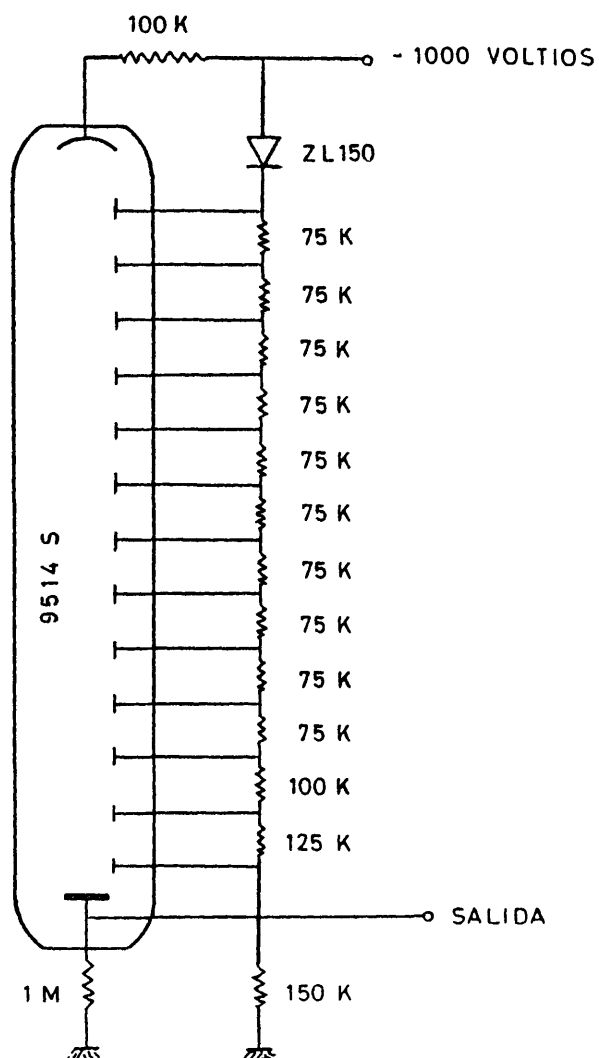


Fig. 7.4. DIVISOR DE TENSION PARA EL TUBO FOTOMULTIPLICADOR

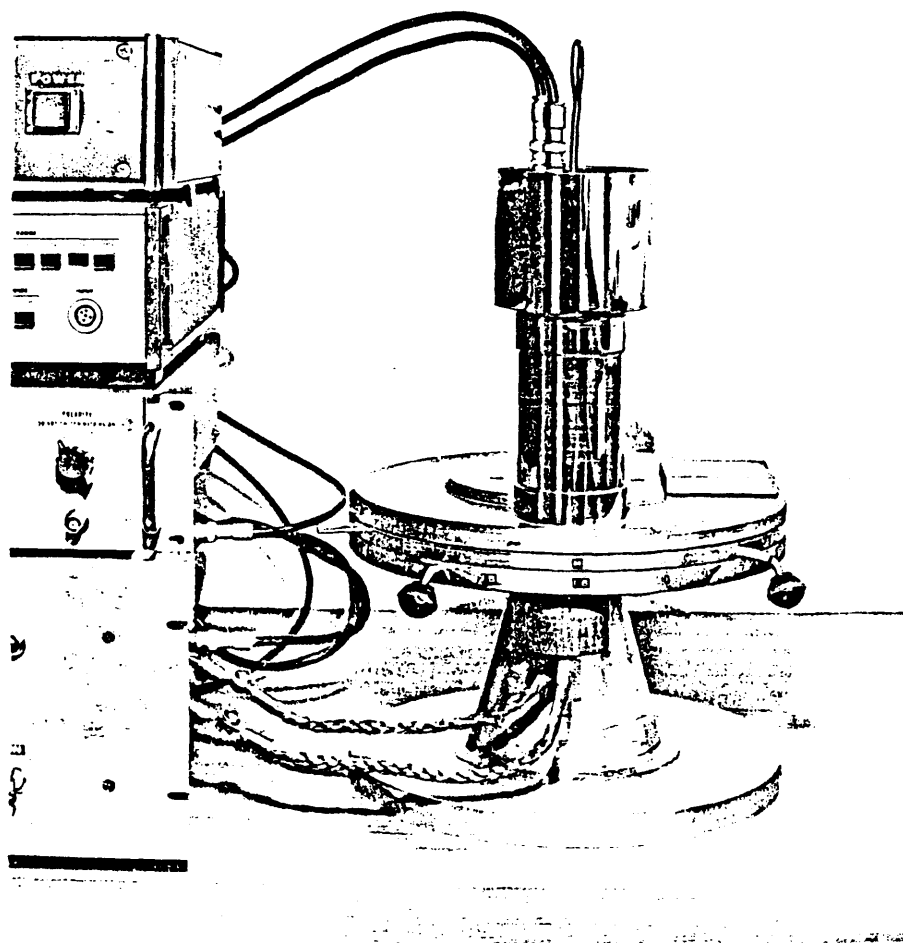
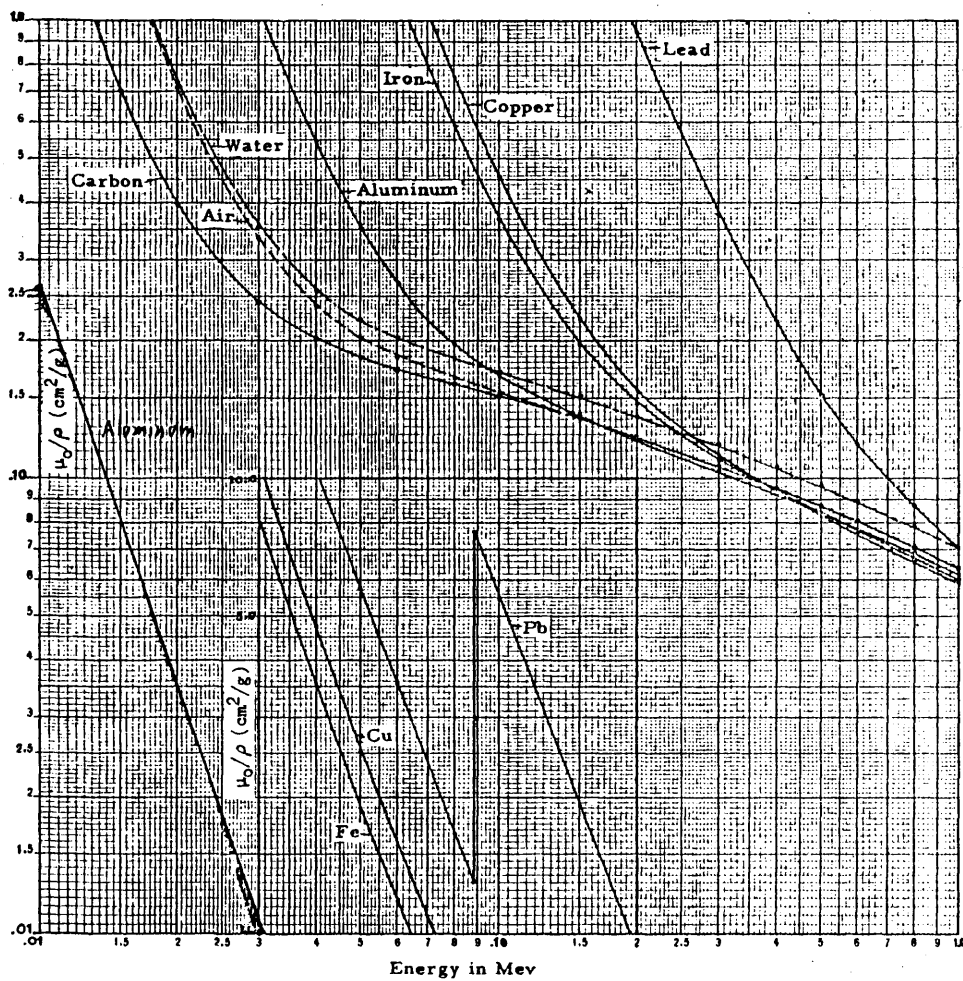


Fig. 8.1-Equipo de lectura múltiple.

TOTAL MASS ATTENUATION COEFFICIENTS FOR X- AND GAMMA RADIATION *



* Calculations include photoelectric effect, total Compton effect, pair production, and Rayleigh scattering. (Data obtained from Gladys R. White, N.B.S. Report No. 1003 (1952)). The total attenuation coefficients for air in the range 0.3 to 3.0 Mev may be considered identical to those of carbon. Insert extends the range for lead, copper, and iron.

Fig. 9.1- Coeficientes de atenuación mäsicos totales en función de la energía

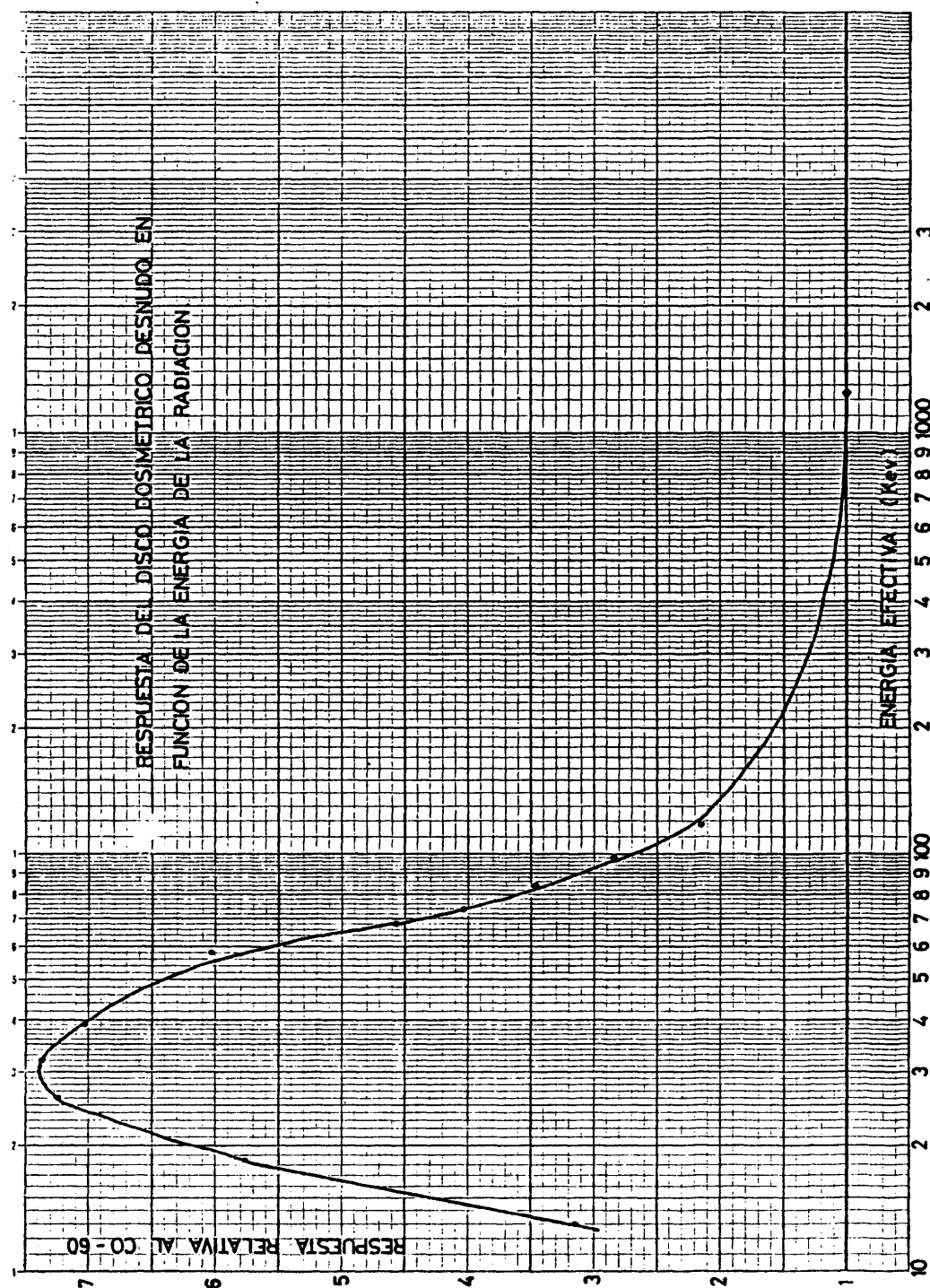


Fig. 11.1 Respuesta del disco dosimétrico desnudo en función de la energía de la radiación.

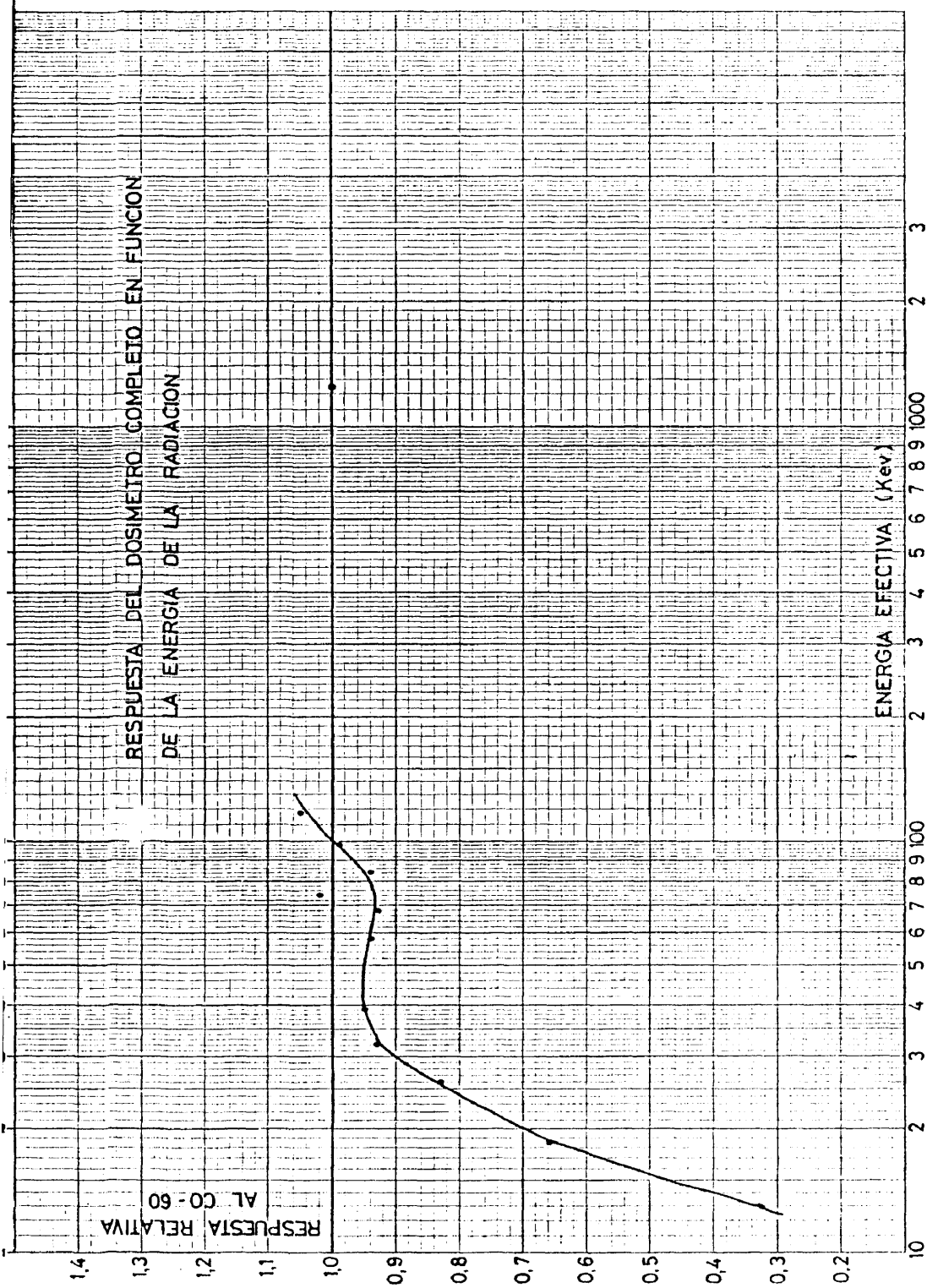


Fig. 11.2.- Respuesta del dosímetro completo en función de la energía de la radiación.

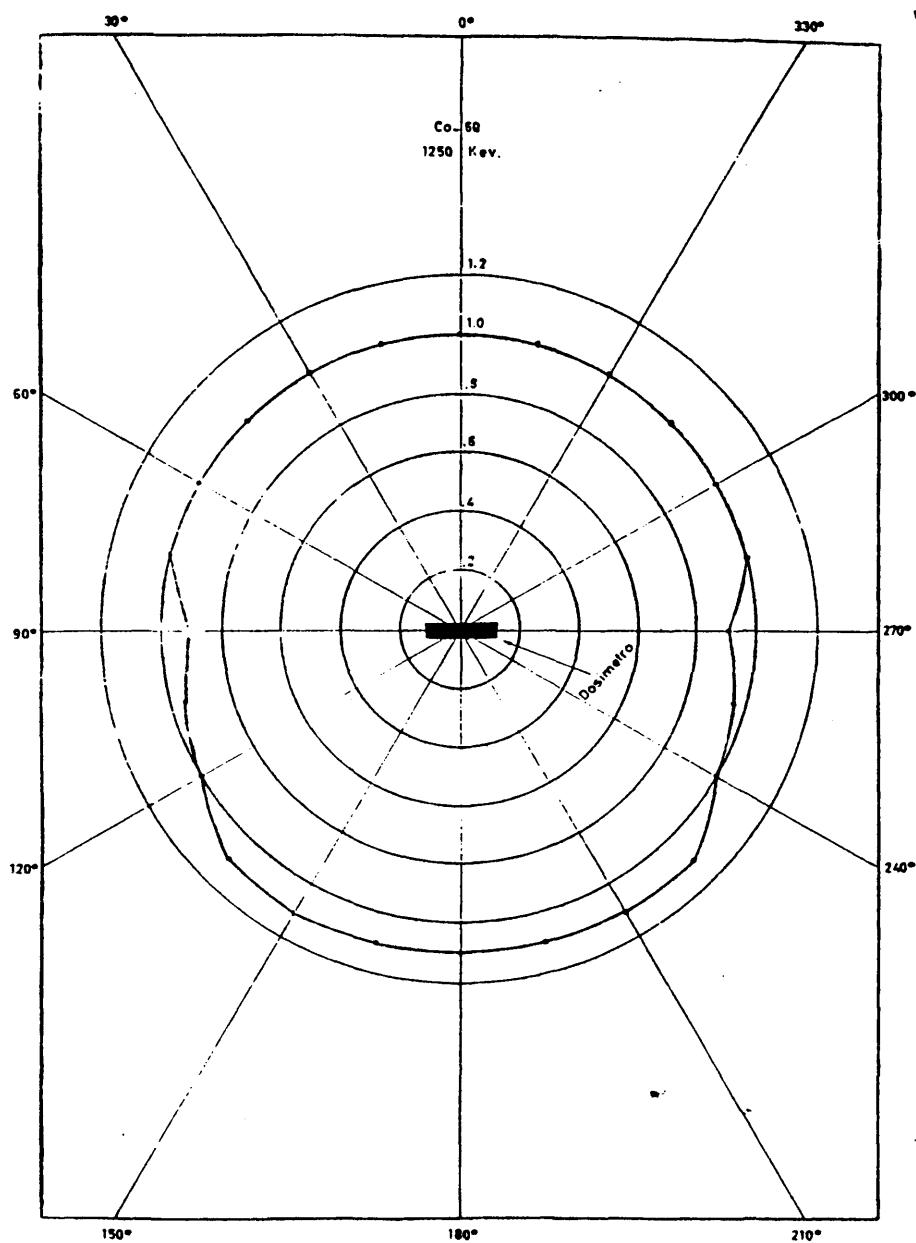


Fig. 11.3.-Respuesta del dosímetro en función del ángulo de incidencia de la radiación para el Co-60 (1.250 Kev).

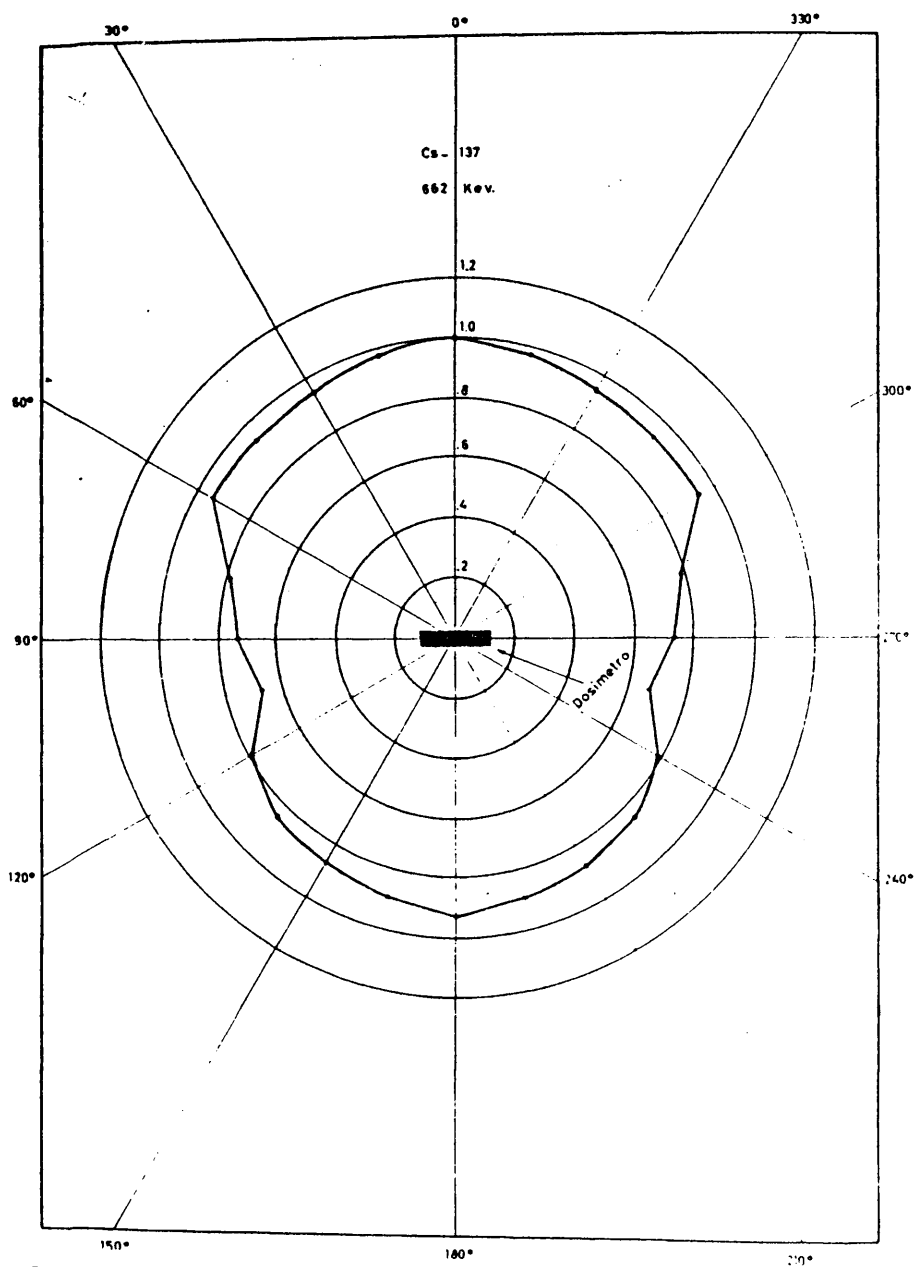
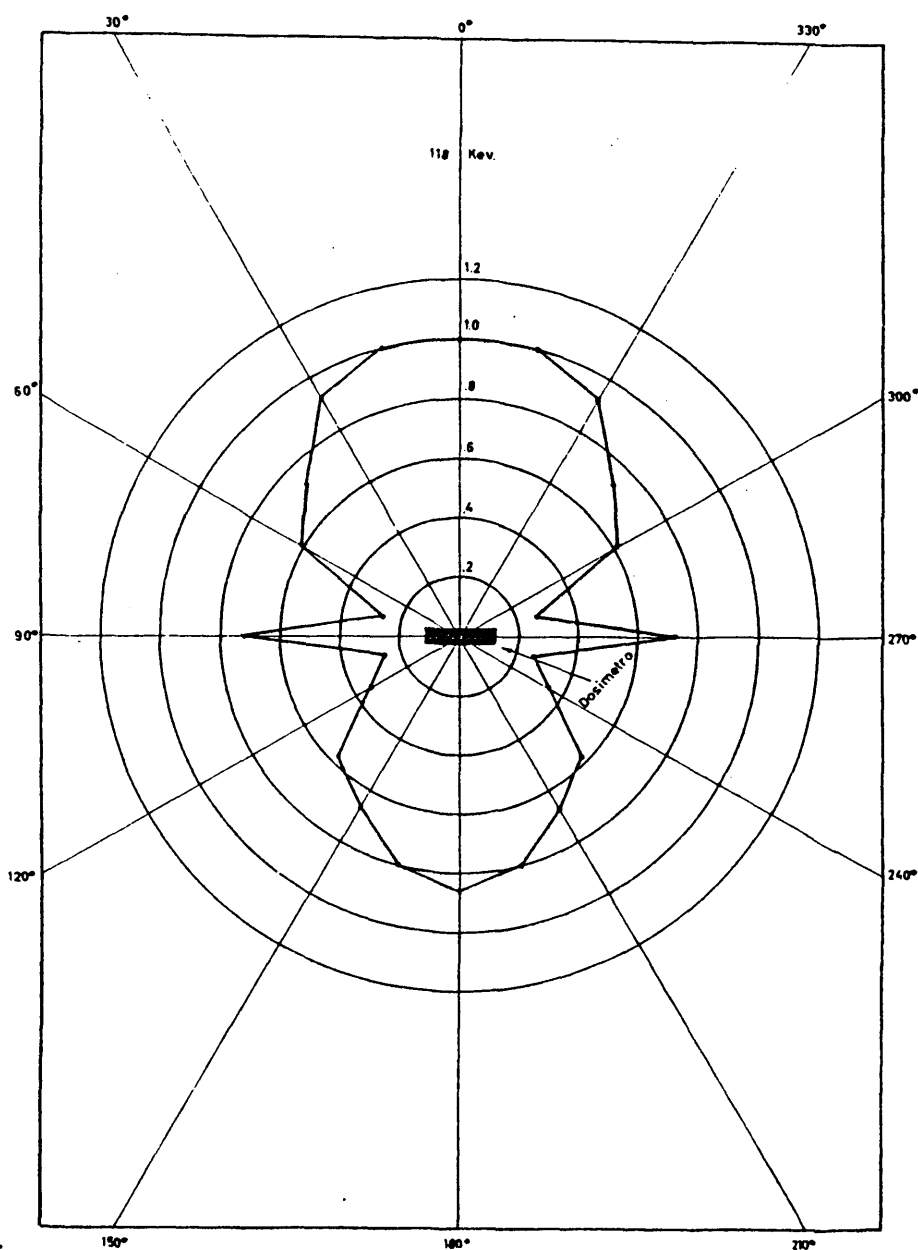
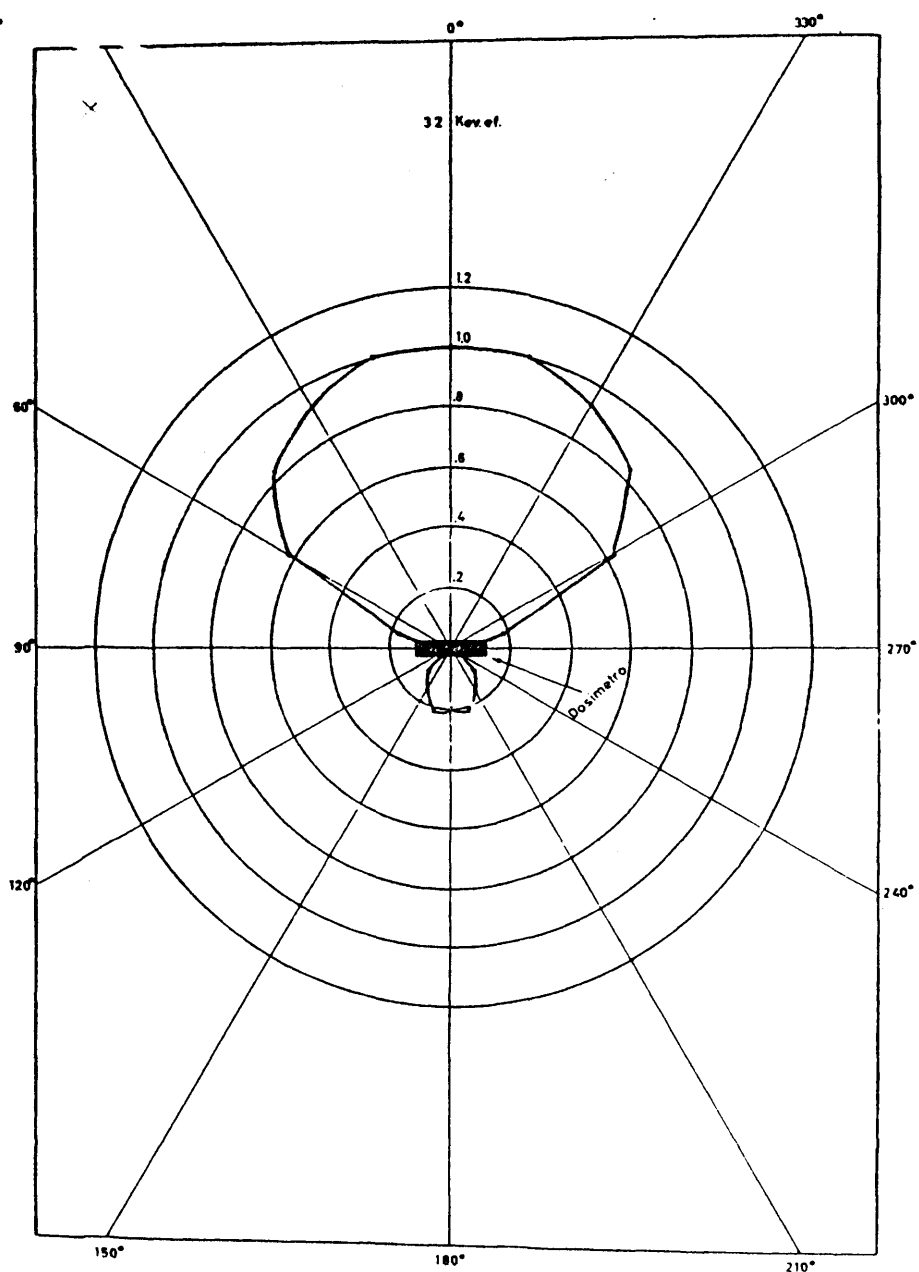


Fig. 11.4- Respuesta del dosímetro en función del ángulo de incidencia de la radiación para el Cs-137 (662 Kev).



—Respuesta del dosimetro en función del ángulo de incidencia de rayos X de 118 Kev de energía efectiva.

Fig. 11.5-



-Respuesta del dosimetro en función del ángulo de incidencia de rayos X de 32 Kev de energía efectiva.

Fig. 11.6-

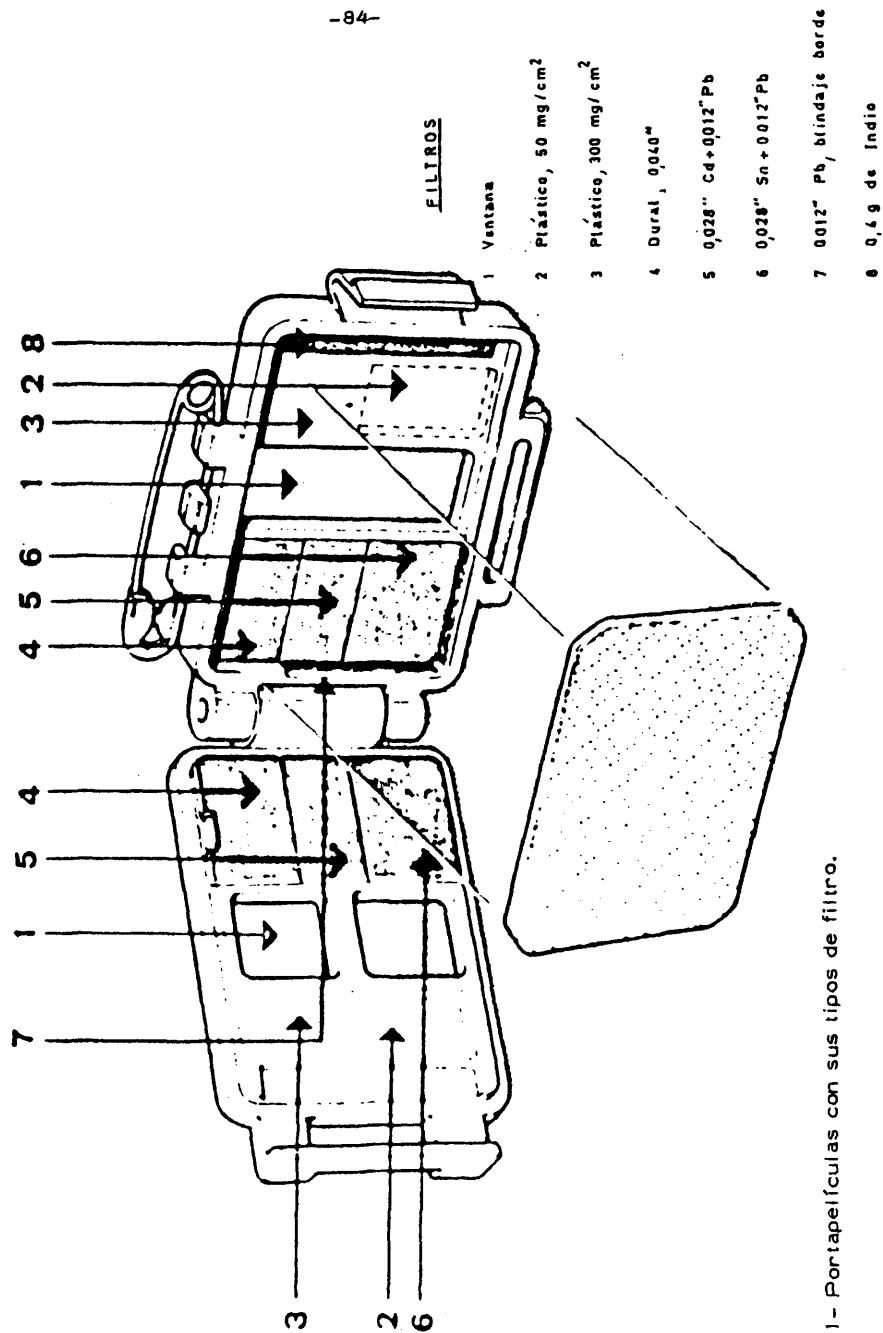


Fig. 14. 1 - Portapelfculas con sus tipos de filtro.

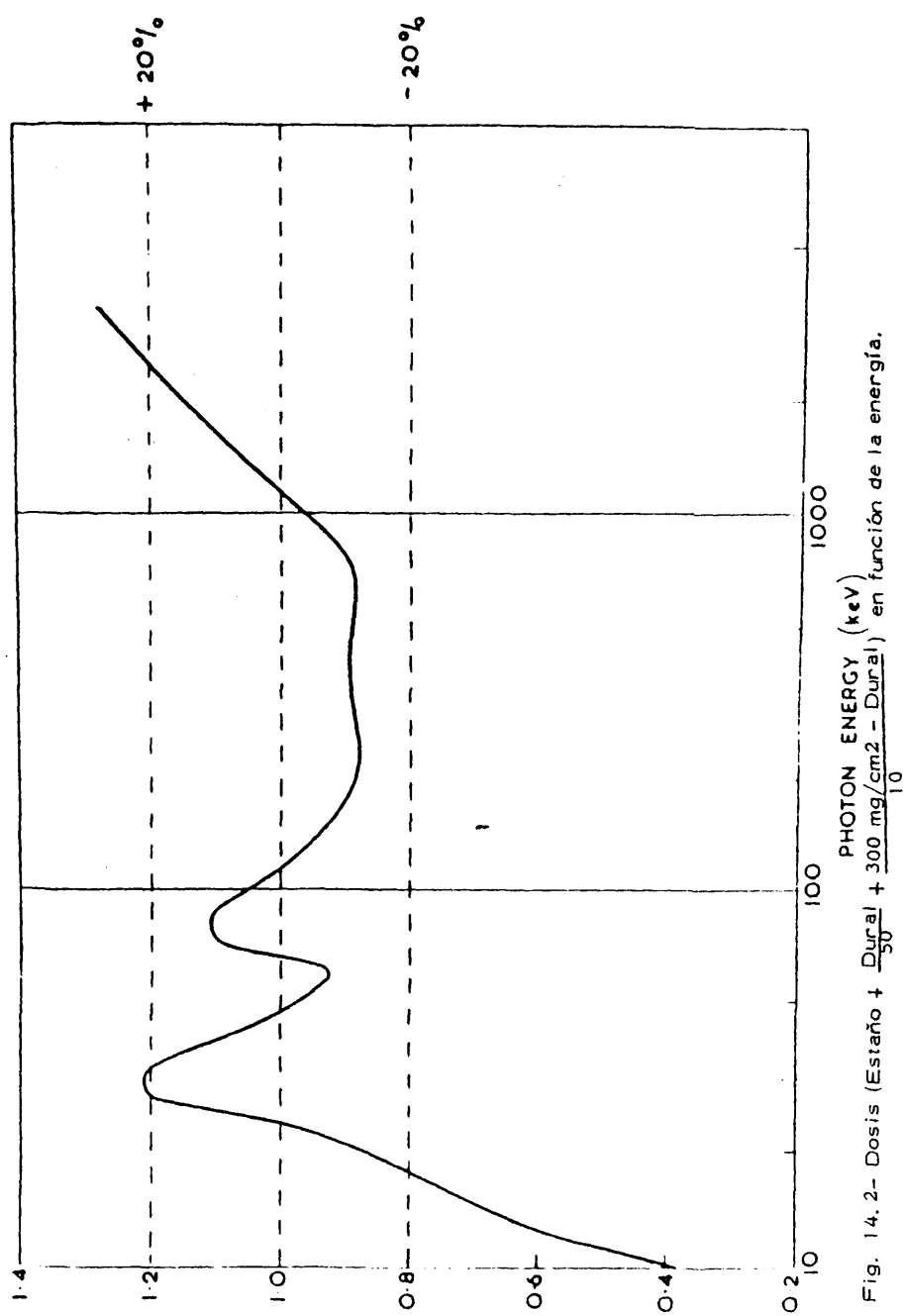


Fig. 14. 2- Dosis (Estaño + $\frac{\text{Dural} + 300 \text{ mg/cm}^2 - \text{Dural}}{50}$) en función de la energía.

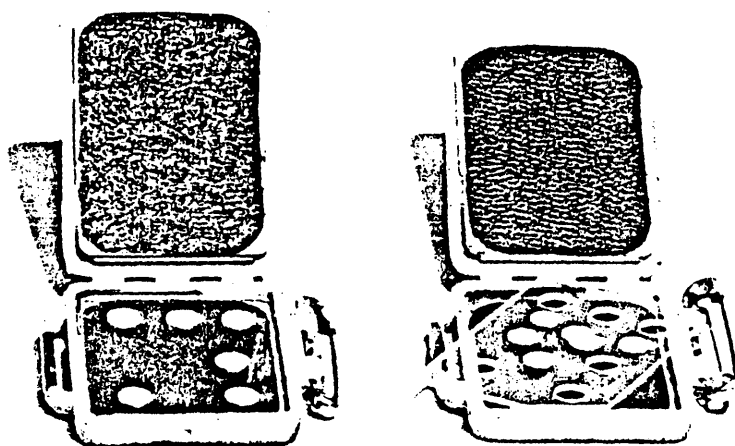


Fig. 15.1 - Sustitución de la película fotográfica por comprimidos de F₂Ca

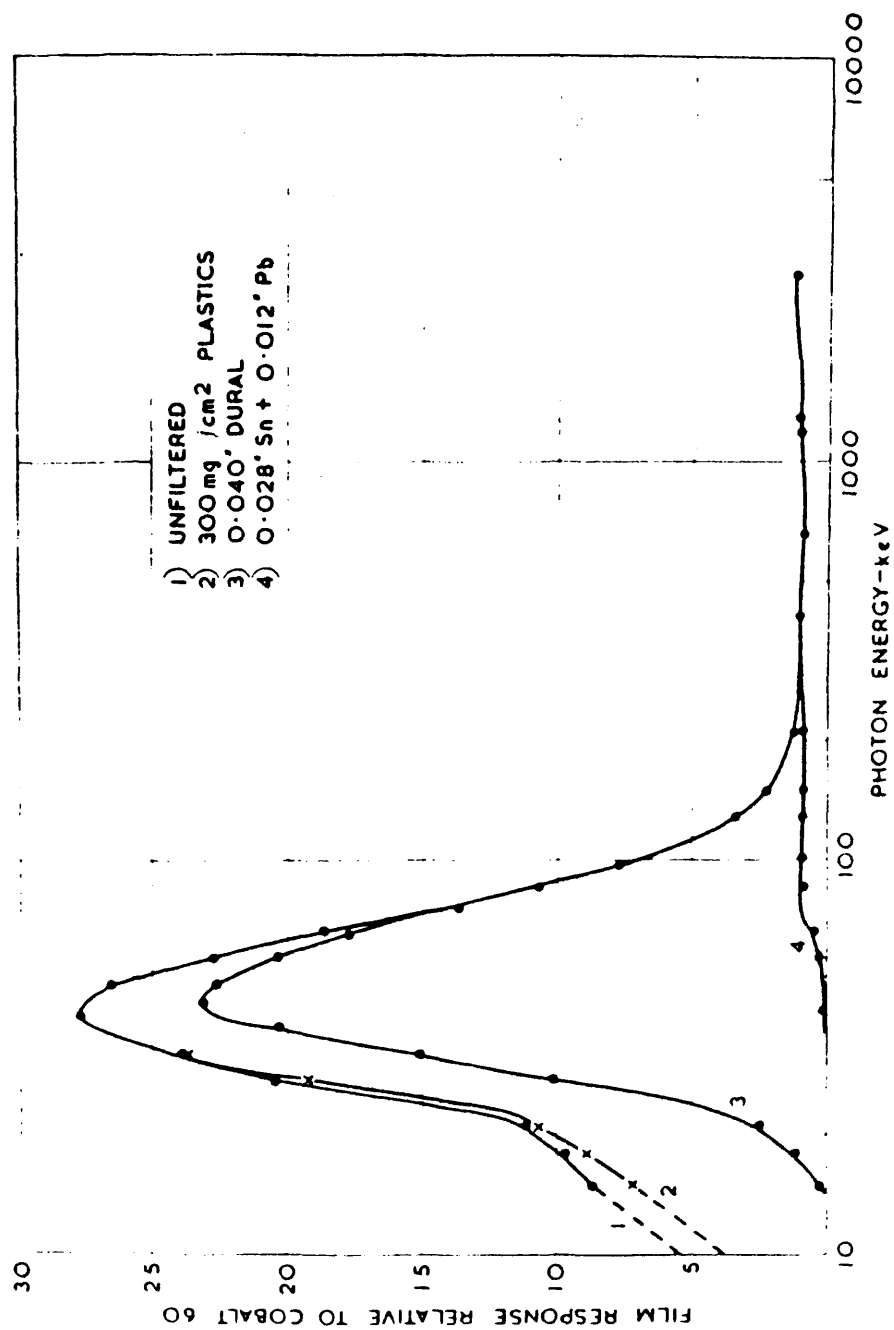


Fig. 15.2 - Respuesta a energía de la película Kodak R. M.

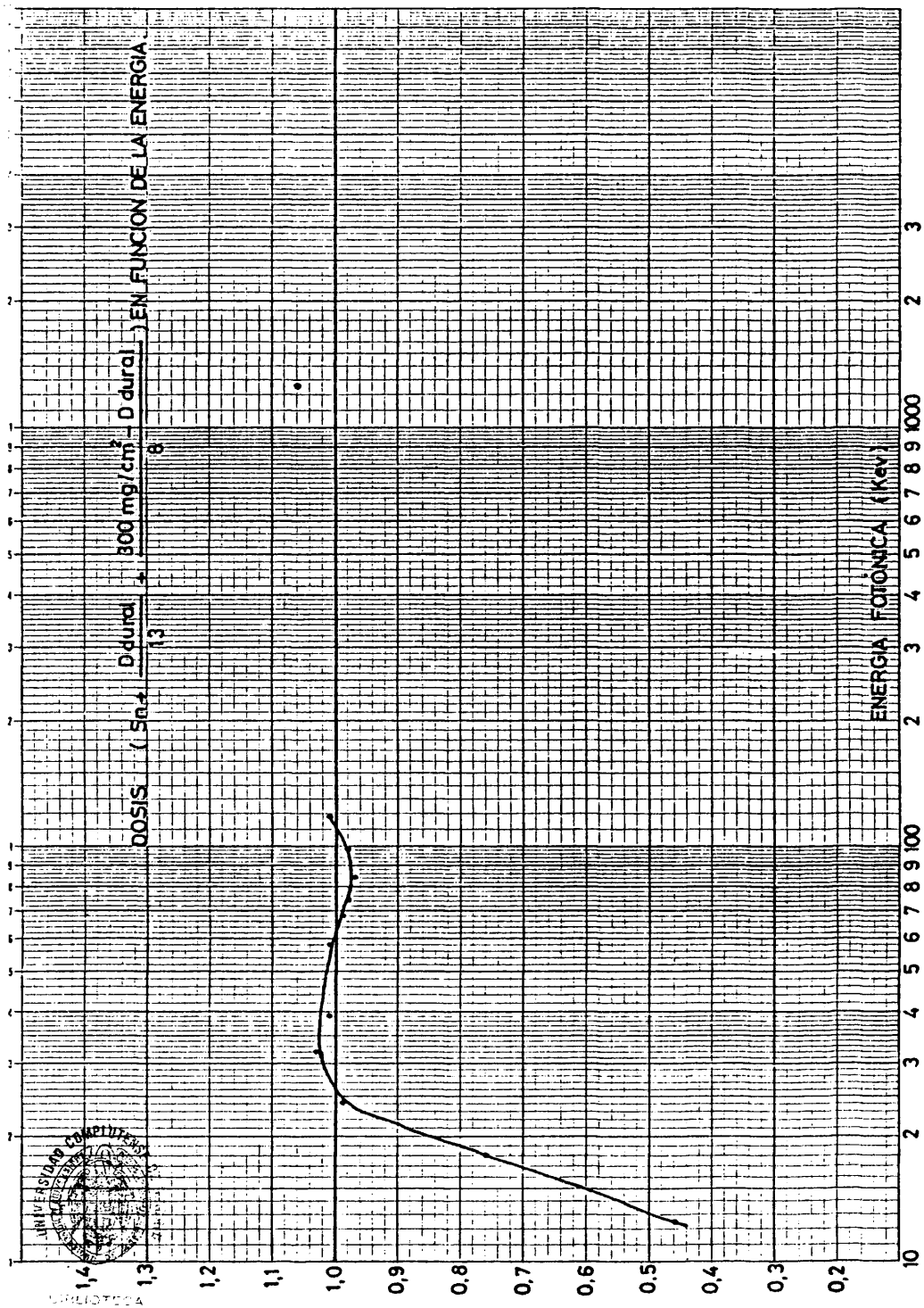


Fig. 15.3. - Dosis (Sn + Ddural) + 300 mg/cm² en función de la energía